

Docket No.: 60188-702

PATENT

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re Application of	:	Customer Number: 20277
	:	
Akio MISAKA	:	Confirmation Number:
	:	
Serial No.:	:	Group Art Unit:
	:	
Filed: November 21, 2003	:	Examiner:
	:	
For: PHOTOMASK, PATTERN FORMATION METHOD USING PHOTOMASK AND MASK DATA CREATION METHOD		

**CLAIM OF PRIORITY AND
TRANSMITTAL OF CERTIFIED PRIORITY DOCUMENT**

Mail Stop CPD
Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

Sir:

In accordance with the provisions of 35 U.S.C. 119, Applicant hereby claim the priority of:

Japanese Patent Application No. 2003-037845, filed on February 17, 2003.

cited in the Declaration of the present application. A certified copy is submitted herewith.

Respectfully submitted,

MCDERMOTT, WILL & EMERY


Michael E. Fogarty
Registration No. 36,139

600 13th Street, N.W.
Washington, DC 20005-3096
(202) 756-8000 MEF:gav
Facsimile: (202) 756-8087
Date: November 21, 2003

60188-702

AKIO MISAKA

November 20, 2003

日 本 国 特 許 庁

JAPAN PATENT OFFICE

McDermott, Will & Emery

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出 願 年 月 日

Date of Application:

2003年 2月17日

出 願 番 号

Application Number:

特願2003-037845

[ST.10/C]:

[JP2003-037845]

出 願 人

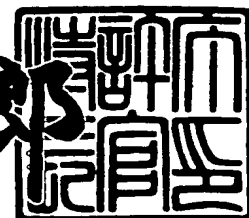
Applicant(s):

松下電器産業株式会社

2003年 6月 5日

特 許 庁 長 官
Commissioner,
Japan Patent Office

太田信一郎



出証番号 出証特2003-3043738

【書類名】 特許願

【整理番号】 2926440215

【提出日】 平成15年 2月17日

【あて先】 特許庁長官 殿

【国際特許分類】 H01L 21/027

【発明者】

 【住所又は居所】 大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 松下電器産業株式会社内

 【氏名】 三坂 章夫

【特許出願人】

 【識別番号】 000005821

 【氏名又は名称】 松下電器産業株式会社

【代理人】

 【識別番号】 100077931

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 前田 弘

【選任した代理人】

 【識別番号】 100094134

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 小山 廣毅

【選任した代理人】

 【識別番号】 100110939

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 竹内 宏

【選任した代理人】

 【識別番号】 100110940

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 嶋田 高久

【選任した代理人】

【識別番号】 100113262

【弁理士】

【氏名又は名称】 竹内 祐二

【選任した代理人】

【識別番号】 100115059

【弁理士】

【氏名又は名称】 今江 克実

【選任した代理人】

【識別番号】 100115691

【弁理士】

【氏名又は名称】 藤田 篤史

【選任した代理人】

【識別番号】 100117581

【弁理士】

【氏名又は名称】 二宮 克也

【選任した代理人】

【識別番号】 100117710

【弁理士】

【氏名又は名称】 原田 智雄

【選任した代理人】

【識別番号】 100121500

【弁理士】

【氏名又は名称】 後藤 高志

【選任した代理人】

【識別番号】 100121728

【弁理士】

【氏名又は名称】 井関 勝守

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 014409

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 0217869

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 フォトマスク、そのフォトマスクを用いたパターン形成方法及びマスクデータ作成方法

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 透過性基板上に形成されたマスクパターンと、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部とを有するフォトマスクであって、

前記マスクパターンは、露光により転写される主パターンと、露光光を回折させ且つ露光により転写されない補助パターンとを有し、

前記主パターンは、前記露光光を部分的に透過させる第 1 の透過率を有し且つ前記透光部を基準として前記露光光を同位相で透過させる第 1 の半遮光部と、前記透光部を基準として前記露光光を反対位相で透過させる位相シフターとから構成されており、

前記補助パターンは、前記露光光を部分的に透過させる第 2 の透過率を有し且つ前記透光部を基準として前記露光光を同位相で透過させる第 2 の半遮光部から構成されていることを特徴とするフォトマスク。

【請求項 2】 前記第 1 の透過率は 6 % 以上で且つ 1 5 % 以下であることを特徴とする請求項 1 に記載のフォトマスク。

【請求項 3】 前記第 2 の透過率は 6 % 以上で且つ 5 0 % 以下であることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載のフォトマスク。

【請求項 4】 前記第 1 の半遮光部及び前記第 2 の半遮光部は、前記透光部を基準として前記露光光を、 $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下の位相差で透過させると共に、前記位相シフターは、前記透光部を基準として前記露光光を、 $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下の位相差で透過させることを特徴とする請求項 1 ～ 3 のいずれか 1 項に記載のフォトマスク（但し n は整数）。

【請求項 5】 前記補助パターンは、前記主パターンとの間に前記透光部を挟むように、前記位相シフターから $M \times (\lambda / (2 \times \sin \phi))$ 離れた位置に設けられていることを特徴とする請求項 1 ～ 4 のいずれか 1 項に記載のフォトマス

ク（但し、 ϕ は斜入射露光における斜入射角であり、 λ は前記露光光の波長であり、 M は露光機の縮小投影光学系の縮小倍率である）。

【請求項 6】 前記補助パターンは、前記主パターンとの間に前記透光部を挟むように、前記位相シフターから $M \times \left(\left(\lambda / (2 \times \sin \phi) \right) + \left(\lambda / (N A + \sin \phi) \right) \right)$ 離れた位置に設けられていることを特徴とする請求項 1～4 のいずれか 1 項に記載のフォトマスク（但し、 ϕ は斜入射露光における斜入射角であり、 λ は前記露光光の波長であり、 M 及び $N A$ は露光機の縮小投影光学系の縮小倍率及び開口数である）。

【請求項 7】 前記斜入射角 ϕ は $\phi 1$ 以上で且つ $\phi 2$ 以下であることを特徴とする請求項 5 又は 6 に記載のフォトマスク（但し、 $\phi 1$ 及び $\phi 2$ は露光機の斜入射照明系の最小斜入射角及び最大斜入射角である）。

【請求項 8】 前記斜入射角 ϕ は $(\phi 1 + \phi 2) / 2$ であることを特徴とする請求項 5 又は 6 に記載のフォトマスク（但し、 $\phi 1$ 及び $\phi 2$ は露光機の斜入射照明系の最小斜入射角及び最大斜入射角である）。

【請求項 9】 前記斜入射角 ϕ は $(\xi + \phi 2) / 2$ であることを特徴とする請求項 5 又は 6 に記載のフォトマスク（但し、 $\phi 2$ は露光機の斜入射照明系の最大斜入射角であり、 ξ は $\sin \xi = 0.4 \times N A$ （但し $N A$ は露光機の縮小投影光学系の開口数である）を満たす角度である）。

【請求項 10】 前記位相シフターは前記主パターンの中心部に前記第 1 の半遮光部によって囲まれるように配置されていることを特徴とする請求項 1～9 のいずれか 1 項に記載のフォトマスク。

【請求項 11】 前記位相シフターは前記主パターンの周縁部に配置されていることを特徴とする請求項 1～9 のいずれか 1 項に記載のフォトマスク。

【請求項 12】 前記位相シフターは、前記透過性基板を掘り下げることにより形成されていることを特徴とする請求項 1～11 のいずれか 1 項に記載のフォトマスク。

【請求項 13】 前記第 1 の半遮光部及び前記第 2 の半遮光部は、前記透過性基板上に形成された金属薄膜からなることを特徴とする請求項 1～12 のいずれか 1 項に記載のフォトマスク。

【請求項14】 透過性基板上に形成されたマスクパターンと、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部とを有するフォトマスクであって、

前記マスクパターンは、露光により転写される主パターンと、露光光を回折させ且つ露光により転写されない補助パターンとを有し、

前記主パターンは、前記透光部を基準として前記露光光を反対位相で透過させる位相シフターを有し、

前記補助パターンは、前記主パターンとの間に前記透光部を挟むように、前記位相シフターから $M \times (\lambda / (2 \times \sin \phi))$ 離れた位置に設けられていることを特徴とするフォトマスク（但し、 ϕ は斜入射露光における斜入射角であり、 λ は前記露光光の波長であり、 M は露光機の縮小投影光学系の縮小倍率である）。

【請求項15】 透過性基板上に形成されたマスクパターンと、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部とを有するフォトマスクであって、

前記マスクパターンは、露光により転写される主パターンと、露光光を回折させ且つ露光により転写されない補助パターンとを有し、

前記主パターンは、前記透光部を基準として前記露光光を反対位相で透過させる位相シフターを有し、

前記補助パターンは、前記主パターンとの間に前記透光部を挟むように、前記位相シフターから $M \times ((\lambda / (2 \times \sin \phi)) + (\lambda / (NA + \sin \phi)))$ 離れた位置に設けられていることを特徴とするフォトマスク（但し、 ϕ は斜入射露光における斜入射角であり、 λ は前記露光光の波長であり、 M 及び NA は露光機の縮小投影光学系の縮小倍率及び開口数である）。

【請求項16】 前記斜入射角 ϕ は ϕ_1 以上で且つ ϕ_2 以下であることを特徴とする請求項14又は15に記載のフォトマスク（但し、 ϕ_1 及び ϕ_2 は露光機の斜入射照明系の最小斜入射角及び最大斜入射角である）。

【請求項17】 前記斜入射角 ϕ は $(\phi_1 + \phi_2) / 2$ であることを特徴とする請求項14又は15に記載のフォトマスク（但し、 ϕ_1 及び ϕ_2 は露光機の斜

入射照明系の最小斜入射角及び最大斜入射角である)。

【請求項 1 8】 前記斜入射角 ϕ は $(\xi + \phi 2) / 2$ であることを特徴とする請求項 1 4 又は 1 5 に記載のフォトマスク (但し、 $\phi 2$ は露光機の斜入射照明系の最大斜入射角であり、 ξ は $\sin \xi = 0.4 \times NA$ (但し NA は露光機の縮小投影光学系の開口数である) を満たす角度である)。

【請求項 1 9】 前記補助パターンは、前記露光光を部分的に透過させる第 2 の透過率を有し且つ前記透光部を基準として前記露光光を同位相で透過させる半遮光部から構成されていることを特徴とする請求項 1 4 ～ 1 8 のいずれか 1 項に記載のフォトマスク。

【請求項 2 0】 前記位相シフターは、前記透光部を基準として前記露光光を、 $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下の位相差で透過させることを特徴とする請求項 1 4 ～ 1 9 のいずれか 1 項に記載のフォトマスク (但し n は整数)。

【請求項 2 1】 前記主パターンはその外形形状を持つ遮光部を有し、前記位相シフターは前記遮光部の中心部に配置されていることを特徴とする請求項 1 4 ～ 2 0 のいずれか 1 項に記載のフォトマスク。

【請求項 2 2】 前記位相シフターは前記主パターンの周縁部に配置されていることを特徴とする請求項 1 4 ～ 2 0 のいずれか 1 項に記載のフォトマスク。

【請求項 2 3】 前記主パターンは前記位相シフターのみから構成されていることを特徴とする請求項 1 4 ～ 2 0 のいずれか 1 項に記載のフォトマスク。

【請求項 2 4】 前記位相シフターは、前記透過性基板を掘り下げることにより形成されていることを特徴とする請求項 1 4 ～ 2 3 のいずれか 1 項に記載のフォトマスク。

【請求項 2 5】 請求項 1 ～ 2 4 のいずれか 1 項に記載のフォトマスクを用いたパターン形成方法であって、

基板上にレジスト膜を形成する工程と、

前記レジスト膜に前記フォトマスクを介して前記露光光を照射する工程と、

前記露光光を照射された前記レジスト膜を現像してレジストパターンを形成する工程とを備えていることを特徴とするパターン形成方法。

【請求項 2 6】 前記露光光を照射する工程で斜入射照明法を用いることを特徴とする請求項 2 5 に記載のパターン形成方法。

【請求項 2 7】 透過性基板上に形成されたマスクパターンと、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部とを有するフォトマスクのマスクデータ作成方法であって、

前記フォトマスクを介して露光光をレジストに照射することによって形成される前記レジストの所望の非感光領域と対応する主パターンを作成する工程と、

前記主パターンの内部に配置され且つ前記透光部を基準として前記露光光を反対位相で透過させる位相シフターの形状を決定する工程と、

前記透過性基板上における前記位相シフターから所定の距離だけ離れた位置に、前記露光光を回折させる補助パターンを配置する工程と、

前記主パターンにおける前記透光部との境界となるエッジを C D 調整用エッジに設定する工程と、

シミュレーションを用いて、前記位相シフターが配置された前記主パターンと前記補助パターンとにより形成されるレジストパターンの寸法を予測する工程と、

前記予測されたレジストパターンの寸法が所望の寸法と一致しない場合、前記 C D 調整用エッジを移動させることにより前記主パターンの変形を行なう工程とを備えていることを特徴とするマスクデータ作成方法。

【請求項 2 8】 前記主パターンは、前記透光部を基準として露光光を同位相で透過させる半遮光部を有することを特徴とする請求項 2 7 に記載のマスクデータ作成方法。

【請求項 2 9】 前記位相シフターは、前記主パターンにおける寸法が所定値以下の領域の中心部に前記半遮光部によって囲まれるように配置されることを特徴とする請求項 2 8 に記載のマスクデータ作成方法。

【請求項 3 0】 前記位相シフターは前記主パターンの周縁部に配置されることを特徴とする請求項 2 8 に記載のマスクデータ作成方法。

【請求項 3 1】 前記主パターンは遮光部を有し、
前記位相シフターは、前記主パターンにおける寸法が所定値以下の領域の中心

部に前記遮光部によって囲まれるように配置されることを特徴とする請求項 2 7 に記載のマスクデータ作成方法。

【発明の詳細な説明】

【0 0 0 1】

【発明の属する技術分野】

本発明は、半導体集積回路装置の製造に用いられる微細パターン形成用のフォトマスク、その作成方法及びそのフォトマスクを用いたパターン形成方法に関し、さらには、マスクパターンの設計方法に関する。

【0 0 0 2】

【従来の技術】

近年、半導体を用いて実現する大規模集積回路装置（以下、L S I と称する）の高集積化のために、回路パターンの微細化がますます必要となってきた。その結果、回路を構成する配線パターンの細線化が非常に重要となってきた。

【0 0 0 3】

以下、従来の光露光システムによる配線パターンの細線化について、ポジ型レジストプロセスを用いる場合を例として説明する。ここで、ラインパターンとは、レジスト膜における露光光によって感光されない部分、つまり現像後に残存するレジスト部分（レジストパターン）である。また、スペースパターンとは、レジスト膜における露光光によって感光される部分、つまり現像によりレジストが除去されてなる開口部分（レジスト除去パターン）である。尚、ポジ型レジストプロセスに代えてネガ型レジストプロセスを用いる場合、前述のラインパターン及びスペースパターンのそれぞれの定義を入れ替えればよい。

【0 0 0 4】

従来、光露光システムを用いてパターン形成を行なう場合、石英等からなる透明な基板（透過性基板）上にC r 等からなる完全遮光パターンが所望のパターンと対応するように描かれたフォトマスクを用いていた。このような、フォトマスクにおいては、C r パターンが存在する領域は、ある波長の露光光を全く透過させない（実質的に透過率 0 % の）遮光部となる一方、C r パターンが存在しない領域（開口部）は、前述の露光光に対して透過性基板と同等の透過率（実質的に

100%)を持つ透光部となる。そして、このフォトマスクを用いて露光を行なった場合、遮光部はレジストの非感光部と対応すると共に開口部（透光部）はレジストの感光部と対応する。従って、このようなフォトマスク、つまり、ある波長の露光光に対しての遮光部及び透光部から構成されるフォトマスクはバイナリーマスクと呼ばれる。

【0005】

一般に、光露光システムでは、前述のバイナリーマスクを用いて露光を行なったときに形成される像（露光によって被露光材料上に生じるエネルギー強度分布）のコントラストは λ/NA に反比例する。ここで、 λ は光源から照射される露光光の波長であり、 NA は露光機の縮小投影光学系（具体的には投影レンズ）の開口数である。このため、レジストパターンとして形成可能な寸法は λ/NA に比例する。従って、パターンの微細化を実現するためには、露光光の波長 λ を小さくする短波長化と、開口数 NA を大きくする高 NA 化とが有効な手段である。

【0006】

一方、LSIを構成する素子の形成に起因する段差、又は基板表面が平坦ではないこと等を理由として、前述の光露光システムによって形成される像が理想的な焦点からずれる場合がある。このため、デフォーカス状態で形成されるパターンの寸法も所定の範囲内に保たれなければならない。パターンの寸法が所定の範囲内に保たれるデフォーカス値、つまりパターンの寸法精度が保証されるデフォーカス値の限界は焦点深度（DOF）と呼ばれている。すなわち、パターンを微細化するためには、像のコントラストを強調することと共に、DOFの値を向上させることも必要となる。しかしながら、DOFは λ/NA^2 に比例するので、コントラストを向上させるために短波長化及び高 NA 化を行なった場合、DOFの値が低下してしまう。

【0007】

以上のように、短波長化及び高 NA 化以外の方法によりコントラストを向上させることと、波長 λ 及び開口数 NA を変えずにDOFを向上させることとを同時に実現できる技術が重要となってきている。

【0008】

コントラスト及びDOFを大幅に向上させるための手法のうち最も代表的な手法として、フォトマスク上の周期パターンに対して斜入射露光を行なう方法がある。しかし、斜入射露光によっては、 λ/NA 以下の短い周期で配置されたパターンの場合にしか大きな効果が得られないので、任意のパターンの微細化には有効な手法ではない。この斜入射露光の欠点を補う方法として、補助パターンを用いる方法（以下、補助パターン法と称する）がある。

【0009】

また、別の代表的な手法として、フォトマスク上の周期パターンに対して斜入射露光を行なう方法がある。しかし、斜入射露光によっては、 λ/NA 以下の短い周期で配置されたパターンの場合にしか大きな効果が得られないので、任意のパターンの微細化には有効な手法ではない。この斜入射露光の欠点を補う方法として、補助パターンを用いる方法（以下、補助パターン法と称する）がある。

【0010】

以下、特許文献1に開示されている補助パターン法（以下、第1の従来例と称する）について説明する。図21は、第1の従来例で用いられるフォトマスクの平面図を示している。図21に示すフォトマスクは、 $1/5$ 縮小投影露光を行なうステツパにおいて使用される。図21に示すように、マスク基板となる透明なガラス基板10の表面に、クロムからなる遮光膜11が設けられている。遮光膜11には、露光により転写される主パターン（回路パターン）である第1の開口部12が設けられている。また、遮光膜11における第1の開口部12の両側に、露光により転写されず且つ主パターンの転写精度を向上させる補助パターンである一対の第2の開口部13が設けられている。ここで、第1の開口部12の幅は例えば $1.5\mu\text{m}$ に設定されており、各第2の開口部13の幅は例えば $0.75\mu\text{m}$ に設定されている。また、第1の開口部12の中心と各第2の開口部13の中心との間の距離は例えば $4.5\mu\text{m}$ に設定されている。すなわち、第1の従来例で用いられるフォトマスクにおいては、主パターンである回路パターンと隣り合うように、該回路パターンの寸法よりも小さい寸法の補助パターンが設けられている。しかし、第1の従来例に係る補助パターン法によっては、DOFがわずかに向上するものの、本来の周期パターンの場合と同程度の効果は得られない

【0011】

以下、第1の従来例を改良した方法である、特許文献2に開示されている補助パターン法（以下、第2の従来例と称する）について説明する。図22は、第2の従来例で用いられるフォトマスクの平面図を示している。図22に示すように、マスク基板となる透明なガラス基板20の上に主パターン21が設けられていると共に、ガラス基板20の上における遮光部21の両側に補助パターン22が周期的に配置されている。主パターン21は、下層の低透過率膜と上層の遮光膜（クロム膜）との積層膜から構成されている。また、補助パターン22は、前述の積層膜のうちの上層の遮光膜が除去された、残りの低透過率膜から構成されている。ここで、低透過率膜からなる補助パターン22は露光時にレジストの非感光部（つまりレジストパターン）を形成するものではない。従って、この透過率の低い補助パターン22を主パターン21に対して周期的に配置して斜入射露光を行なうことによってDOFの向上を図ることができる。

【0012】

【特許文献1】

特開平5-165194号公報

【特許文献2】


特開平9-73166号公報

【0013】

【発明が解決しようとする課題】

ところで、位相シフターを用いることによって、コントラスト及びDOFを大幅に向上させることができるが、それは次のような場合に限られる。すなわち、フォトマスク上において、微細なラインパターンの両側に、透光部（開口部）と、透光部を基準として露光光を180°の位相差で透過させる位相シフターとをそれぞれ配置できる場合のみである。従って、位相シフターを用いても、一般的なLSIにおける配線パターンの微細部分の全てに亘って、コントラスト及びDOFの向上効果を得ることはできない。

【0014】



また、斜入射露光を用いることによって、完全な周期パターンについてはコントラスト及びDOFを大きく向上できる効果が得られる。しかし、一般的なLSIにおける孤立パターン等を含む配線パターンの微細部分の全てに亘って、前述の効果をj得ることはできない。このとき、補助パターンを用いることによって、DOF等に若干の改善は見られるが（第1の従来例）、その効果は、完全な周期パターンと比べれば僅かである。また、補助パターンとして、透過率の低いパターンを用いることによって、補助パターン配置の自由度を向上させ、それによりパターン配置における周期性を高めることが可能となるが（第2の従来例）、この場合も、次のような問題を生じる。すなわち、第2の従来例による実質的な効果は、補助パターンを太くできることによって補助パターンの加工が容易になるということのみである。すなわち、コントラスト及びDOFの向上については、第1の従来例（細い補助パターンを用いる場合）と同程度の効果しか得られない。その理由は、コントラストやDOFの向上効果は、主パターン及び補助パターンからなるマスクパターンが周期パターンであるかどうかjに依存して決まるのではなく、露光時にマスクパターンによって形成される像（エネルギー強度分布）の周期性が高いかどうかjに依存して決まるからである。

【0015】

前記に鑑み、本発明は、任意形状のパターンの形成においてコントラスト及びDOFを向上させることができるフォトマスク、パターン形成方法及びマスクデータ作成方法を提供することを目的とする。

【0016】

【課題を解決するための手段】

前記の目的を達成するために、本発明に係る第1のフォトマスクは、透過性基板上に形成されたマスクパターンと、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部とを有するフォトマスクを前提とし、マスクパターンは、露光により転写される主パターンと、露光光を回折させ且つ露光により転写されない補助パターンとを有し、主パターンは、露光光を部分的に透過させる第1の透過率を有し且つ透光部を基準として露光光を同位相で透過させる第1の半遮光部と、透光部を基準として露光光を反対位相で透過させる位相シフターとから構成

されており、補助パターンは、露光光を部分的に透過させる第2の透過率を有し且つ透光部を基準として露光光を同位相で透過させる第2の半遮光部から構成されている。

【0017】

第1のフォトリソマスクによると、主パターンが半遮光部と位相シフターとから構成されているため、位相シフターを透過した光によって透光部及び半遮光部を透過した光の一部分を打ち消すことができる。このため、主パターンと対応する遮光像における光強度分布のコントラストを強調できる。また、主パターンとは別に、低透過率の補助パターンが設けられているため、補助パターンを適切な位置に配置することにより、主パターンの位相シフターを透過した光と干渉する回折光を発生させることができる。従って、主パターンの転写像におけるデフォーカス特性が向上し、その結果、DOF特性が向上する。

【0018】

また、第1のフォトリソマスクによると、補助パターンが半遮光部であるため、補助パターン配置の自由度が向上し、それにより主パターンを含めたパターン配置における周期性を高めることができるので、DOF特性がより一層向上する。また、補助パターンが半遮光部であるため、露光により転写されないという条件下で補助パターンを太くできるので、その加工が容易になる。

【0019】

第1のフォトリソマスクにおいて、第1の透過率は6%以上で且つ15%以下であることが好ましい。

【0020】

このようにすると、パターン形成時におけるレジスト膜の膜減り防止又はレジスト感度の最適化を達成できると共に、それらの効果と、DOF向上効果及びコントラスト向上効果とを両立させることができる。

【0021】

第1のフォトリソマスクにおいて、第2の透過率は6%以上で且つ50%以下であることが好ましい。

【0022】

このようにすると、補助パターンの透過率が高すぎることによってレジストの非感光部が形成されてしまうことを防止しつつ、回折光によるDOF向上効果を確実に実現できる。

【0023】

第1のフォトリソマスクにおいて、第1の半遮光部及び第2の半遮光部は、透光部を基準として露光光を、 $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下の位相差で透過させると共に、位相シフターは、透光部を基準として露光光を、 $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下の位相差で透過させてもよい。すなわち、本明細書においては、 $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差は同位相とみなし、 $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）の位相差は反対位相とみなす。

【0024】

第1のフォトリソマスクにおいて、補助パターンは、主パターンとの間に透光部を挟むように、位相シフターから $M \times (\lambda / (2 \times \sin \phi))$ 離れた位置に設けられていることが好ましい（但し、 ϕ は斜入射露光における斜入射角であり、 λ は露光光の波長であり、 M は露光機の縮小投影光学系の縮小倍率である）。

【0025】

このようにすると、回折光によるDOF向上効果を確実に実現できる。また、位相シフターと補助パターンとの間の距離が $M \times (\lambda / (2 \times \sin \phi))$ の近傍の値であっても前述の効果がある程度生じる。

【0026】

尚、本明細書において、位相シフターと補助パターンとの間の距離とは、それぞれの中心同士との間の距離を意味する。例えば、ライン状の位相シフターに対して平行に、相似形を有する補助パターンが設けられている場合、位相シフター及び補助パターンのそれぞれの中心線間の距離を意味する。

【0027】

第1のフォトリソマスクにおいて、補助パターンは、主パターンとの間に透光部を挟むように、位相シフターから $M \times ((\lambda / (2 \times \sin \phi)) + (\lambda / (NA$

$+ \sin \phi$)) 離れた位置に設けられていることが好ましい (但し、 ϕ は斜入射露光における斜入射角であり、 λ は露光光の波長であり、 M 及び NA は露光機の縮小投影光学系の縮小倍率及び開口数である)。

【0028】

このようにすると、回折光による DOF 向上効果を確実に実現できる。また、位相シフターと補助パターンとの間の距離が $M \times ((\lambda / (2 \times \sin \phi)) + (\lambda / (NA + \sin \phi)))$ の近傍の値であっても前述の効果がある程度生じる。さらに、第1の補助パターンが位相シフターから $M \times (\lambda / (2 \times \sin \phi))$ 離れた位置に設けられ、且つ第2の補助パターンが位相シフターから $M \times ((\lambda / (2 \times \sin \phi)) + (\lambda / (NA + \sin \phi)))$ 離れた位置に設けられていると、次のような効果が得られる。すなわち、第1の補助パターンが第1次回折光発生パターンとして機能することに加えて、第2の補助パターンが第2次回折光発生パターンとして機能するので、 DOF 向上効果をさらに増大させることができる。

【0029】

尚、第1のフォトマスクにおいて、補助パターンが位相シフターから $M \times (\lambda / (2 \times \sin \phi))$ 又は $M \times ((\lambda / (2 \times \sin \phi)) + (\lambda / (NA + \sin \phi)))$ 離れた位置に設けられている場合、斜入射角 ϕ は ϕ_1 以上で且つ ϕ_2 以下であるか、斜入射角 ϕ は $(\phi_1 + \phi_2) / 2$ であるか又は斜入射角 ϕ は $(\xi + \phi_2) / 2$ であることが好ましい (但し、 ϕ_1 及び ϕ_2 は露光機の斜入射照明系の最小斜入射角及び最大斜入射角であり、 ξ は $\sin \xi = 0.4 \times NA$ (但し NA は露光機の縮小投影光学系の開口数である) を満たす角度である)。

【0030】

このようにすると、主パターンの転写像におけるデフォーカス特性の向上効果が確実に得られる。

【0031】

第1のフォトマスクにおいて、位相シフターは主パターンの中心部に第1の半遮光部によって囲まれるように配置されていることが好ましい。

【0032】

このようにすると、主パターンと対応する遮光像の中心部における光強度分布のコントラストを強調できるので、デフォーカス特性を良好に保ちながら、例えば微細なラインパターンの形成を行なうことができる。

【 0 0 3 3 】

第 1 のフォトマスクにおいて、位相シフターは主パターンの周縁部に配置されていることが好ましい。

【 0 0 3 4 】

このようにすると、透光部を透過した光の像の主パターン近傍における光強度分布のコントラストを強調できるので、デフォーカス特性を良好に保ちながら、例えば微細なコンタクトパターンの形成を行なうことができる。

【 0 0 3 5 】

第 1 のフォトマスクにおいて、位相シフターは、透過性基板を掘り下げることにより形成されていることが好ましい。

【 0 0 3 6 】

このようにすると、パターン形成において非常に優れたデフォーカス特性が発揮される。

【 0 0 3 7 】

第 1 のフォトマスクにおいて、第 1 の半遮光部及び第 2 の半遮光部は、透過性基板上に形成された金属薄膜からなることが好ましい。

【 0 0 3 8 】

このようにすると、第 1 及び第 2 の半遮光部を簡単に形成できるので、フォトマスクの加工を容易に行なうことができる。

【 0 0 3 9 】

本発明に係る第 2 のフォトマスクは、透過性基板上に形成されたマスクパターンと、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部とを有するフォトマスクを前提とし、マスクパターンは、露光により転写される主パターンと、露光光を回折させ且つ露光により転写されない補助パターンとを有し、主パターンは、透光部を基準として露光光を反対位相で透過させる位相シフターを有し、補助パターンは、主パターンとの間に透光部を挟むように、位相シフターか

ら $M \times (\lambda / (2 \times \sin \phi))$ 離れた位置に設けられている（但し、 ϕ は斜入射露光における斜入射角であり、 λ は露光光の波長であり、 M は露光機の縮小投影光学系の縮小倍率である）。

【0040】

第2のフォトマスクによると、主パターンが位相シフターを有するため、位相シフターを透過した光によって透光部を透過した光の一部分を打ち消すことができる。このため、主パターンと対応する遮光像における光強度分布のコントラストを強調できる。また、主パターンとは別に補助パターンが、主パターンの位相シフターから $M \times (\lambda / (2 \times \sin \phi))$ 離れた位置に設けられているため、主パターンの位相シフターを透過した光と干渉する回折光を確実に発生させることができる。従って、主パターンの転写像におけるデフォーカス特性が向上し、その結果、DOF特性が向上する。また、位相シフターと補助パターンとの間の距離が $M \times (\lambda / (2 \times \sin \phi))$ の近傍の値であっても前述の効果がある程度生じる。尚、第2のフォトマスクにおいて、主パターンは位相シフターのみから構成されていてもよい。また、補助パターンは遮光部であってもよいし又は半遮光部であってもよい。

【0041】

本発明に係る第3のフォトマスクは、透過性基板上に形成されたマスクパターンと、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部とを有するフォトマスクを前提とし、マスクパターンは、露光により転写される主パターンと、露光光を回折させ且つ露光により転写されない補助パターンとを有し、主パターンは、透光部を基準として露光光を反対位相で透過させる位相シフターを有し、補助パターンは、主パターンとの間に透光部を挟むように、位相シフターから $M \times ((\lambda / (2 \times \sin \phi)) + (\lambda / (NA + \sin \phi)))$ 離れた位置に設けられている（但し、 ϕ は斜入射露光における斜入射角であり、 λ は露光光の波長であり、 M 及び NA は露光機の縮小投影光学系の縮小倍率及び開口数である）。

【0042】

第3のフォトマスクによると、主パターンが位相シフターを有するため、位相

シフターを透過した光によって透光部を透過した光の一部を打ち消すことができる。このため、主パターンと対応する遮光像における光強度分布のコントラストを強調できる。また、主パターンとは別に補助パターンが、主パターンの位相シフターから $M \times \left(\left(\lambda / (2 \times \sin \phi) \right) + \left(\lambda / (NA + \sin \phi) \right) \right)$ 離れた位置に設けられているため、主パターンの位相シフターを透過した光と干渉する回折光を確実に発生させることができる。従って、主パターンの転写像におけるデフォーカス特性が向上し、その結果、DOF特性が向上する。また、位相シフターと補助パターンとの間の距離が $M \times \left(\left(\lambda / (2 \times \sin \phi) \right) + \left(\lambda / (NA + \sin \phi) \right) \right)$ の近傍の値であっても前述の効果がある程度生じる。尚、第3のフォトマスクにおいて、主パターンは位相シフターのみから構成されていてもよい。また、補助パターンは遮光部であってもよいし又は半遮光部であってもよい。

【0043】

第2又は第3のフォトマスクにおいて、斜入射角 ϕ は ϕ_1 以上で且つ ϕ_2 以下であるか、斜入射角 ϕ は $(\phi_1 + \phi_2) / 2$ であるか又は斜入射角 ϕ は $(\xi + \phi_2) / 2$ であることが好ましい（但し、 ϕ_1 及び ϕ_2 は露光機の斜入射照明系の最小斜入射角及び最大斜入射角であり、 ξ は $\sin \xi = 0.4 \times NA$ （但し NA は露光機の縮小投影光学系の開口数である）を満たす角度である）。

【0044】

このようにすると、主パターンの転写像におけるデフォーカス特性の向上効果が確実に得られる。

【0045】

第2又は第3のフォトマスクにおいて、補助パターンは、露光光を部分的に透過させる第2の透過率を有し且つ透光部を基準として露光光を同位相で透過させる半遮光部から構成されていることが好ましい。

【0046】

このようにすると、補助パターンが半遮光部であるため、補助パターン配置の自由度が向上し、それにより主パターンを含めたパターン配置における周期性を高めることができるので、DOF特性がより一層向上する。また、補助パターン

が半遮光部であるため、露光により転写されないという条件下で補助パターンを太くできるので、その加工が容易になる。

【 0 0 4 7 】

第2又は第3のフォトマスクにおいて、位相シフターは、透光部を基準として露光光を、 $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下の位相差で透過させてもよい。

【 0 0 4 8 】

第2又は第3のフォトマスクにおいて、主パターンはその外形形状を持つ遮光部を有し、位相シフターは遮光部の中心部に配置されていることが好ましい。

【 0 0 4 9 】

このようにすると、主パターンと対応する遮光像の中心部における光強度分布のコントラストを強調できるので、デフォーカス特性を良好に保ちながら、例えば微細なラインパターンの形成を行なうことができる。

【 0 0 5 0 】

第2又は第3のフォトマスクにおいて、位相シフターは主パターンの周縁部に配置されていることが好ましい。

【 0 0 5 1 】

このようにすると、透光部を透過した光の像の主パターン近傍における光強度分布のコントラストを強調できるので、デフォーカス特性を良好に保ちながら、例えば微細なコンタクトパターンの形成を行なうことができる。

【 0 0 5 2 】

第2又は第3のフォトマスクにおいて、主パターンは位相シフターのみから構成されていてもよい。

【 0 0 5 3 】

第2又は第3のフォトマスクにおいて、位相シフターは、透過性基板を掘り下げることにより形成されていることが好ましい。

【 0 0 5 4 】

このようにすると、パターン形成において非常に優れたデフォーカス特性が発揮される。

【 0 0 5 5 】

本発明に係るパターン形成方法は、本発明に係る第 1、第 2 又は第 3 のフォトマスクを用いたパターン形成方法を前提とし、基板上にレジスト膜を形成する工程と、レジスト膜に本発明のフォトマスクを介して露光光を照射する工程と、露光光を照射されたレジスト膜を現像してレジストパターンを形成する工程とを備えている。

【 0 0 5 6 】

本発明のパターン形成方法によると、第 1～第 3 のフォトマスクと同様の効果を得られる。また、本発明のパターン形成方法において、露光光を照射する工程で斜入射照明法を用いることが好ましい。このようにすると、フォトマスクを透過した光の光強度分布において、主パターン及び透光部のそれぞれと対応する部分の間でのコントラストが向上する。また、光強度分布のフォーカス特性も向上する。従って、パターン形成における露光マージン及びフォーカスマージンが向上する。言い換えると、デフォーカス特性に優れた微細パターン形成が可能となる。

【 0 0 5 7 】

本発明に係るマスクデータ作成方法は、透過性基板上に形成されたマスクパターンと、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部とを有するフォトマスクのマスクデータ作成方法を前提とし、フォトマスクを介して露光光をレジストに照射することによって形成されるレジストの所望の非感光領域と対応する主パターンを作成する工程と、主パターンの内部に配置され且つ透光部を基準として露光光を反対位相で透過させる位相シフターの形状を決定する工程と、透過性基板上における位相シフターから所定の距離だけ離れた位置に、露光光を回折させる補助パターンを配置する工程と、主パターンにおける透光部との境界となるエッジを CD 調整用エッジに設定する工程と、シミュレーションを用いて、位相シフターが配置された主パターンと補助パターンとにより形成されるレジストパターンの寸法を予測する工程と、予測されたレジストパターンの寸法が所望の寸法と一致しない場合、CD 調整用エッジを移動させることにより主パターンの変形を行なう工程とを備えている。



【0058】

本発明のマスクデータ作成方法によると、まず、パターン形成特性が最適化されるように、主パターン内の位相シフターの形状及び補助パターンの配置位置を決定した後、シミュレーションにより予測されるレジストパターンの寸法が所望の寸法と一致するように、主パターンのエッジをCD調整用エッジとして主パターンの変形を行なう。このため、優れたパターン形成特性を持つマスクパターンを実現できる。

【0059】

本発明のマスクデータ作成方法において、主パターンは、透光部を基準として露光光を同位相で透過させる半遮光部を有していてもよい。この場合、位相シフターが、主パターンにおける寸法が所定値以下の領域の中心部に半遮光部によって囲まれるように配置されると、より微細な所望のパターンを形成でき且つ優れたパターン形成特性を持つマスクパターンを実現できる。また、位相シフターが主パターンの周縁部に配置されると、任意の形状を持つ所望のパターンを形成でき且つ優れたパターン形成特性を持つマスクパターンを実現できる。

【0060】

本発明のマスクデータ作成方法において、主パターンが遮光部を有し、位相シフターが、主パターンにおける寸法が所定値以下の領域の中心部に遮光部によって囲まれるように配置されると、より微細な所望のパターンを形成でき且つ優れたパターン形成特性を持つマスクパターンを実現できる。

【0061】

【発明の実施の形態】

（前提事項）

本発明の各実施形態を説明するに当たっての前提事項について説明する。

【0062】

通常、フォトマスクは縮小投影型の露光機で使用されるため、マスク上のパターン寸法を議論する場合には縮小倍率を考慮しなければならない。しかし、以下の各実施形態を説明する際には、混乱を避けるため、形成しようとする所望のパターン（例えばレジストパターン）と対応させてマスク上のパターン寸法を説明

する場合、特に断らない限り縮小倍率で該寸法を換算した値を用いている。具体的には、M分の1縮小投影システムにおいて、幅 $M \times 100 \text{ nm}$ のマスクパターンによって幅 100 nm のレジストパターンを形成した場合にも、マスクパターン幅及びレジストパターン幅は共に 100 nm であるとする。

【0063】

また、本発明の各実施形態においては、特に断らない限り、M及びNAは露光機の縮小投影光学系の縮小倍率及び開口数をそれぞれ表し、 λ は露光光の波長を表し、 ϕ は斜入射露光における斜入射角を表すものとする。

【0064】

(第1の実施形態)

以下、本発明の第1の実施形態に係るフォトマスクについて図面を参照しながら説明する。

【0065】

図1(a)は、第1の実施形態に係るフォトマスクの平面図であり、図1(b)は、図1(a)のI-I線における断面図である。

【0066】

図1(a)及び(b)に示すように、透過性基板100の上には、露光により転写されるライン状の主パターン101が設けられている。主パターン101は、露光光を部分的に透過させる第1の透過率を有する第1の半遮光部101Aと、位相シフター101Bとから構成されている。第1の半遮光部101Aは、ライン状の位相シフター101Bを取り囲むように形成されている。言い換えると、位相シフター101Bは主パターン101の中心部に配置されている。位相シフター101Bは、例えば透過性基板100を掘り下げることによって形成される。透過性基板100上における主パターン101の両側には、露光光を回折させ且つ露光により転写されない一对の補助パターン102が、主パターン101との間に透光部を挟むように設けられている。補助パターン102は、露光光を部分的に透過させる第2の透過率を有する第2の半遮光部から構成されている。

【0067】

図1(a)及び(b)に示すフォトマスクにおいては、主パターン101と補

助パターン102とからマスクパターンが構成されている。また、透過性基板100における該マスクパターンが形成されていない部分が透光部（開口部）である。

【0068】

また、位相シフター101Bを透過する光と、透光部を透過する光とは反対位相の関係（具体的には両者の位相差が $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）となる関係）にある。

【0069】

また、第1の半遮光部101A及び第2の半遮光部（補助パターン102）のそれぞれを透過する光と、透光部を透過する光とは同位相の関係（具体的には両者の位相差が $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）となる関係）にある。

【0070】

第1の実施形態によると、主パターン101が第1の半遮光部101Aと位相シフター101Bとから構成されているため、位相シフター101Bを透過した光によって透光部及び第1の半遮光部101Aを透過した光の一部分を打ち消すことができる。このため、主パターン101と対応する遮光像における光強度分布のコントラストを強調できる。また、主パターン101とは別に、低透過率の補助パターン102が設けられているため、補助パターン102を適切な位置に配置することにより、主パターン101の位相シフター101Bを透過した光と干渉する回折光を発生させることができる。従って、主パターン101の転写像におけるデフォーカス特性が向上し、その結果、DOF特性が向上する。

【0071】

また、第1の実施形態によると、補助パターン102が半遮光部であるため、補助パターン配置の自由度が向上し、それにより主パターン101を含めたパターン配置における周期性を高めることができるので、DOF特性がより一層向上する。また、補助パターン102が半遮光部であるため、露光により転写されないという条件下で補助パターン102を太くできるので、その加工が容易になる。

【0072】

また、第1の実施形態によると、位相シフター101Bが主パターン101の中心部に配置されているため、主パターン101と対応する遮光像の中心部における光強度分布のコントラストを強調できるので、デフォーカス特性を良好に保ちながら、例えば微細なラインパターンの形成を行なうことができる。

【0073】

また、第1の実施形態によると、位相シフター101Bが、透過性基板100を掘り下げることにより形成されているため、パターン形成において非常に優れたデフォーカス特性が発揮される。

【0074】

尚、第1の実施形態において、主パターン101を構成する第1の半遮光部101Aの第1の透過率は6%以上で且つ15%以下であることが好ましい。このようにすると、パターン形成時におけるレジスト膜の膜減り防止又はレジスト感度の最適化を達成できると共に、それらの効果と、DOF向上効果及びコントラスト向上効果とを両立させることができる。

【0075】

また、第1の実施形態において、補助パターン102（つまり第2の半遮光部）の第2の透過率は6%以上で且つ50%以下であることが好ましい。このようにすると、補助パターン102の透過率が高すぎることによってレジストの非感光部が形成されてしまうことを防止しつつ、回折光によるDOF向上効果を確実に実現できる。

【0076】

また、第1の実施形態において、第1の半遮光部101Aと、補助パターン102となる第2の半遮光部とは同一の半遮光膜、例えば透過性基板100上に形成された金属薄膜から形成されていてもよい。この場合、各半遮光部を簡単に形成できるので、フォトリソ加工を容易に行なうことができる。

【0077】

また、第1の実施形態において、透過性基板100上に、透過率の高い材料からなる位相シフター膜を形成することにより、位相シフター101Bを形成して

もよい。

【0078】

次に、本願発明者により見出された、ライン状の遮光パターン（主パターン101）の中心部に位相シフター（位相シフター101B）が設けられた構造（以下、マスクエンハンサー構造と称する）によって、孤立ラインパターンの解像度を向上させる方法（以下、中心線強調法と称する）について説明する。以下、ポジ型レジストプロセスにより微小ラインパターンを形成する場合を例として説明を行なう。但し、ネガ型レジストプロセスを用いる場合も、ポジ型レジストプロセスにおける微小ラインパターン（レジストパターン）を微小スペースパターン（レジスト除去パターン）と置き換えて考えれば、中心線強調法が同様に成り立つ。また、説明を簡単にするため、位相シフター部分以外の遮光パターンは遮光部から構成されているものとする。

【0079】

マスクエンハンサーにおいて、遮光パターン周辺から遮光パターンの裏側に回り込む光の強度と、位相シフターを透過する光の強度とがちょうど釣り合うように、パターン幅と位相シフター幅とを調整すると、マスクエンハンサーを透過した光の振幅強度は、マスクエンハンサーの中心と対応する位置で0になるような分布を持つ。このとき、マスクエンハンサーを透過した光の強度（振幅強度の2乗）も、マスクエンハンサーの中心と対応する位置で0になるような分布を持つ。すなわち、マスクエンハンサーによって、コントラストの高い像が形成される。ここで、遮光部が、透光部（透過性基板）と同位相で光を透過させ且つ有限の透過率を持つ半遮光部であったとしても、同様の効果が得られる。すなわち、本来、遮光性の弱さを考慮すると、ライン状のマスクパターンとしては好ましくない半遮光部であるが、その内部に位相シフターを設けることによって、つまりマスクエンハンサー構造を用いることによって、コントラストの高い像を形成できる。言い換えると、半遮光部を微細パターン形成に利用することが可能となる。

【0080】

尚、前述のように、中心線強調法はその原理から、マスク上において完全な遮光部のみからなるパターン（完全遮光パターン）の形成が困難になる状況で極め

て有効である。すなわち、完全遮光パターンによって光を遮光することが回折現象のために困難になるようなマスクパターン幅の場合に中心線強調法の効果は特に高くなる。また、中心線強調法においては光の干渉を利用してパターン形成を行なうため、マスクパターンよりも小さいパターン、特に $0.3 \times \lambda / NA$ 以下の寸法を持つパターンを形成する場合に中心線強調法の効果が発揮される。その理由は次の通りである。すなわち、光の干渉効果により究極的には光の波長が2倍になる効果が得られるものの、実質的には光の波長が60%程度増大する効果が得られるので、形成しようとするパターンが、マスクパターンの寸法と比べて60%程度小さい場合が好ましい。

【0081】

次に、回折光発生パターン（補助パターン102）を用いて、マスクエンハンサー（主パターン101）内の開口部（位相シフター101B）を透過した光と干渉する回折光を発生させ、それによってパターン形成時のデフォーカス特性を向上させることができる理由について説明する。

【0082】

図2（a）は、パターンが周期的に配置されたマスクに対して露光を行なった場合に生じる回折現象を説明する図である。図2（a）に示すように、所定のピッチPで複数の遮光パターン（以下、ピッチパターン）151が実質的に無限周期的に配置されたマスク150に対して、光源140から光141が照射されている。ここで、実質的に無限周期的に配置されたとは、実際に無数のピッチパターンが周期的に配置されたとした場合に各ピッチパターンによって得られる効果と同様の効果が、マスク中央部のピッチパターン151によって得られることを意味する。言い換えると、マスク中央部のピッチパターン151からマスク端部のピッチパターン151までの距離が $4 \times \lambda / NA$ 程度以上になるようにピッチパターン151が配置されていることを意味する。

【0083】

図2（a）は、斜入射露光を想定した回折現象を示している。すなわち、光源140は、レンズ152の中心を通る法線（図中の一点鎖線）から距離Sだけ離れた所に位置している。このとき、光源140からの光141のマスク150に

対する入射角（斜入射角） ϕ は $\sin \phi = S \times NA$ で表される。但し、光源140の座標を、開口数NAにより規格化された値を用いて表している。また、ピッチPで配置されたピッチパターン151を通過した光141のn次回折光（nは整数）の回折角 θ_n は $\sin \theta_n = n \times \lambda / P$ で表される。また、斜入射角 ϕ でマスク150に入射した光140の0次回折光142は、レンズ152上における座標（レンズ中心を原点とする1次元座標系上の座標。以下、同じ） $r_0 = -\sin \phi = -S \times NA$ で表される位置に到達する。また、光140の1次回折光（+1次回折光）143は、レンズ152上における座標 $r_1 = r_0 + \sin \theta_1 = r_0 + \lambda / P$ で表される位置に到達する。一般に、レンズ152上におけるn次回折光が到達する位置は、座標 $r_n = r_0 + \sin \theta_n = r_0 + n \times \lambda / P$ で表される。但し、 r_n の絶対値がNAを超えた場合、該n次回折光はレンズ152を通過する回折光とはならないため、ウェハ上に結像されることはない。

【0084】

ところで、理想的なレンズの場合、該レンズを通過してウェハ上に結像する回折光におけるデフォーカス時の位相変化は、レンズにおける回折光の通過位置のレンズ中心からの距離（半径）のみによって決まる。光がレンズに対して垂直に入射する場合、0次回折光は常にレンズ中心を通過し、1次以上の回折光はレンズ中心から離れた位置を通過する。そのため、デフォーカス時には、レンズ中心を通過する0次の回折光と、レンズ中心から離れた位置を通過する高次の回折光との間に位相差が生じるため、像ボケが発生する。

【0085】

図2（b）は、図2（a）に示すマスクに対して、0次回折光及び1次回折光のみがレンズを通過し且つ $r_0 = -r_1$ となる条件下で斜入射露光を行なった場合に生じる回折現象を説明する図である。図2（b）に示すように、0次回折光142及び1次回折光143は共に、レンズ152の中心から同じ距離だけ離れた位置を通過する。そのため、デフォーカス時に受ける位相変化は、0次回折光142と1次回折光143との間で互いに一致する。すなわち、両方の回折光の間で位相差が生じないので、デフォーカスに起因する像ボケが生じなくなる。ここで、 $r_0 = -r_1$ の条件を考慮して、 $r_1 = r_0 + \sin \theta_1$ を変形すると、

$-2 \times r_0 = \sin \theta_1$ となる。さらに、 $\sin \theta_1 = \lambda / P$ 及び $r_0 = -\sin \phi$ の関係を考慮すると、 $2 \times \sin \phi = \lambda / P$ が得られる。従って、 $\sin \phi = \lambda / (2 \times P)$ で表される斜入射角 ϕ の斜入射露光を行なうことにより、デフォーカス特性の優れたパターン形成が可能になる。言い換えると、斜入射角 ϕ の斜入射露光に対しては、 $P = \lambda / (2 \times \sin \phi)$ のピッチで周期パターンがマスク上に設けられている際に良好なデフォーカス特性が得られる。斜入射露光において、実質的に無限周期的に配置されたピッチパターンによってデフォーカス特性が向上する理由は以上の通りである。

【0086】

しかしながら、前述のような良好なデフォーカス特性が得られるのは、ピッチ P が $\lambda / (2 \times \sin \phi)$ 又はそれに近い値であるときのみである。また、このデフォーカス特性向上効果が得られるのは、レンズを通過する回折光が、0次回折光と、+1次回折光及び-1次回折光のうちのいずれか一方の回折光となる条件のときのみである。

【0087】

図2(c)は、図2(a)に示すマスクに対して、0次回折光、+1次回折光及び-1次回折光がレンズを通過する条件下で斜入射露光を行なった場合に生じる回折現象を説明する図である。図2(c)に示すように、0次回折光142がレンズ152上における座標 $r_0 = -\sin \phi$ で表される位置を通過し且つ+1次回折光143がレンズ152上における $r_1 = \sin \phi$ で表される位置を通過する条件下であっても、-1次回折光144がレンズ152を通過する位置である $r_0 - \sin \theta_1$ がレンズ152内に入ってしまう場合には良好なデフォーカス特性は得られない。ここで、-1次回折光144がレンズ152の外を通過する条件は $r_0 - \sin \theta_1 < -NA$ で表される。また、 $r_0 = -\sin \phi$ 及び $\sin \theta_1 = r_1 - r_0 = 2 \times \sin \phi$ を考慮すると、-1次回折光144がレンズ152の外を通過する条件は、 $-\sin \phi - 2 \times \sin \phi < -NA$ 、つまり $3 \times \sin \phi > NA$ となる。

【0088】

すなわち、斜入射角 ϕ に対して、+1次回折光及び-1次回折光の両方がレン

ズを通過する条件は $3 \times \sin \phi < NA$ で表される。この条件に該当する斜入射角 ϕ では、+1 次回折光及び -1 次回折光の両方がレンズを通過すると共に、+1 次回折光及び -1 次回折光のそれぞれがレンズを通過する位置におけるレンズ中心からの距離が異なるため、デフォーカス時に両方の回折光の間の位相差に起因して像ボケが発生してしまう。従って、デフォーカス特性の向上を実現できる斜入射角 ϕ の下限は $\sin \phi > NA/3$ で定義される。尚、 $\sin \phi$ が NA よりも大きくなると 0 次回折光がレンズを通過しなくなることを考慮すると、デフォーカス特性を向上させることができる斜入射角 ϕ の条件は、 $NA > \sin \phi > NA/3$ で表されることになる。

【0089】

次に、図 2 (a) に示すマスクに対してピッチパターンのピッチを変えながら斜入射露光を行なった場合における DOF 特性のシミュレーション結果について説明する。図 3 (a) はシミュレーションに用いた点光源を示す図であり、図 3 (b) はシミュレーションに用いたピッチパターンを示す図であり、図 3 (c) は DOF 特性のシミュレーション結果を示す図である。DOF 特性のシミュレーションにおいては、図 3 (a) に示す一対の光源 (点光源) 140、具体的には、レンズ 152 の中心を通る法線に対して垂直な平面 (二次元座標系) における座標 (光源座標) $(-0.8, 0)$ 及び $(0.8, 0)$ にそれぞれ位置する一対の点光源 140 を用いた。ここで、点光源 140 は ArF (波長 $\lambda = 193 \text{ nm}$) 光源である。また、DOF 特性のシミュレーションにおいては、レンズ開口数 NA が 0.6 であり且つ斜入射角 ϕ が $\sin \phi = 0.48$ (つまり図 2 (a) の距離 S が 0.8) である斜入射露光を用いた。さらに、図 3 (b) に示すピッチパターン 151、つまりピッチ P で無限周期的に配置された各ピッチパターン 151 は、幅 100 nm のライン状の遮光パターンであって、該ピッチパターン 151 を用いて幅 100 nm のパターンを形成する場合についてシミュレーションを行なっている。尚、図 3 (c) に示す DOF の値は、幅 100 nm のパターンが寸法誤差 10 nm 以下で形成されるデフォーカスのレンジである。図 3 (c) に示すように、ピッチパターン 151 のピッチ P が $\lambda / (2 \times \sin \phi)$ (つまり約 $0.20 \mu\text{m}$) である場合又は $\lambda / (2 \times \sin \phi)$ に近い値である場合、

非常に高いDOFが得られている。しかしながら、ピッチPが $\lambda / (2 \times \sin \phi)$ より小さくなくても大きくなっても、DOFの値が急激に低下する。

【0090】

ここで、本願発明者は、図3(c)に示すDOFのピッチ依存性において、ピッチPの変化に対して、DOFが局所的に向上するピッチPの値が等間隔で存在していることに着目した。また、本願発明者は、このDOFが局所的に向上するピッチPの値は、高次の回折光が結像に影響を及ぼす $\lambda / (NA + \sin \phi)$ （つまり約 $0.18 \mu m$ ）の整数倍の値になっていることを、以下に説明するように見出した。

【0091】

光の回折現象においては、隣り合う次数の回折光は互いに反対の位相を有する関係にある。図3(d)は、図2(a)に示すマスクに対して、0次回折光、1次回折光及び2次回折光がレンズを通過する条件下で斜入射露光を行なった場合に生じる回折現象を説明する図である。このとき、図3(d)に示す1次回折光143に対して、2次回折光145は反対の位相を有する。斜入射露光において0次回折光142及び1次回折光143により形成される像に、反対位相を持つ2次回折光145により形成される像が干渉すると、互いに相手の像の強度を打ち消してしまう現象が起こる。しかしながら、デフォーカス時には両方の像の強度が減少する一方、1次回折光143及び2次回折光145のそれぞれの位相が反対であるので、それぞれの像におけるデフォーカスによる劣化は互いに打ち消される。すなわち、1次回折光143によって形成される像に反対位相の2次回折光145によって形成される像が干渉して生じる像におけるデフォーカス特性は向上し、その結果、DOF特性が向上する。

【0092】

このようなDOF特性向上効果が生じる条件は、図3(d)に示すように、2次回折光145がレンズ152を通過する条件であって、それは $\sin \theta_2 < NA - r_0$ で表される。ここで、 $\sin \theta_2 = 2 \times \lambda / P$ 及び $r_0 = -\sin \phi$ を考慮すると、前述の条件は $2 \times \lambda / P < NA + \sin \phi$ で表される。従って、レンズ152において1次回折光143までが通過する状態から2次回折光145

までが通過する状態に変化するピッチ P は $2 \times \lambda / (\sin \phi + NA)$ で表される。また、一般に、 n 次回折光がレンズを通過する条件は $\sin \theta_n = n \times \lambda / P < NA - r_0 = NA + \sin \phi$ で表される。言い換えると、 n 次回折光はピッチ P が $n \times \lambda / (\sin \phi + NA)$ 以上になるとレンズ端を通過することができる。従って、ピッチ $P = n \times \lambda / (\sin \phi + NA)$ (n は 2 以上の整数) のときに局所的に DOF 特性が向上する。

【0093】

以上に説明したように、斜入射露光においては反対位相の関係にある光同士が干渉することにより、デフォーカス特性の向上を実現できる。そこで、本願発明者は、1 次回折光に対して反対位相となる 2 次回折光の強度を強めることと同等の作用を引き起こす操作により、デフォーカス特性の向上が可能になると考えた。具体的には、遮光性パターンを周期的に配置することにより形成される回折光に、1 次回折光に対して反対位相となる 0 次回折光の成分を導入する操作によって、デフォーカス特性の向上が可能になる。これは、前述のマスクエンハンサーの構造を利用して実現できる。すなわち、マスクエンハンサーにおいては、その内部に設けられる位相シフター（開口部）の寸法を制御することによって、マスクエンハンサーによる遮光の程度を調整しながら且つレンズ内を通過する回折光の次数を変化させることなく、反対位相の光を制御できるからである。本願発明者は、マスクエンハンサーを用いれば、ピッチ $P = n \times \lambda / (\sin \phi + NA)$ (n は 2 以上の整数) のときに局所的に僅かに向上していた DOF（図 3（c）参照）が、マスクエンハンサーの位相シフターの寸法に比例して大幅に向上すると予測した。

【0094】

そこで、次に、本願発明者が、ピッチパターンとしてマスクエンハンサーを用いて、図 3（a）～（c）に示すシミュレーションと同様のシミュレーションを行なった結果について説明する。図 4（a）はシミュレーションにおいてピッチパターンとして用いたマスクエンハンサーを示す図であり、図 4（b）は、図 4（a）に示すピッチパターンによる DOF 特性のシミュレーション結果を示す図である。尚、シミュレーションに用いた点光源は図 3（a）に示す点光源と同様

であり、他のシミュレーション条件も図3 (a) ~ (c) に示す場合と同様である。また、図4 (b) においては、マスクエンハンサーの位相シフターの大きさ（開口幅）を変化させた場合の結果も示している。

【0095】

図4 (a) に示すように、所定のピッチPで複数のマスクエンハンサー110が実質的に無限周期的に配置されている。各マスクエンハンサー110は、その外形形状を有する半遮光部111と、マスクエンハンサー110の中央部に半遮光部111によって取り囲まれるように設けられた位相シフター112とから構成される。ここで、マスクエンハンサー110の幅（パターン幅）をL、位相シフター112の幅（開口幅）をWとする。

【0096】

図3 (c) に示すDOF特性と同様に、図4 (b) に示すDOF特性においても、ピッチPが $n \times \lambda / (\sin \phi + NA)$ （nは2以上の整数）のときに、DOFが局所的に増大している。また、パターン幅Lに対する開口幅Wの比（ W/L ）が大きくなるに従ってDOFの向上効果が非常に大きくなっている。すなわち、マスクエンハンサー特有の効果として、マスクエンハンサーが周期的に配置されてなるパターンに対して斜入射露光を行なうと、ピッチPが $\lambda / (2 \times \sin \phi)$ （シミュレーション条件では約 $0.20 \mu m$ ）又はその近傍の値のときだけではなく、ピッチPが $n \times \lambda / (\sin \phi + NA)$ （シミュレーション条件では約 $(n \times 0.20) \mu m$ 。但しnは2以上の整数）という大きな寸法であるときにも、DOF特性に優れたパターン転写が可能となる。

【0097】

さらに、本願発明者が、ピッチパターンとしてのマスクエンハンサーとして、図4 (a) に示す実質的に無限周期的に配置されたマスクエンハンサーに代えて、並列的に配置された3個のマスクエンハンサーを用いて、図3 (a) ~ (c) に示すシミュレーションと同様のシミュレーションを行なった結果について説明する。図5 (a) はシミュレーションにおいて用いたマスクエンハンサーを示す図であり、図5 (b) は、図5 (a) に示すマスクエンハンサーによるDOF特性のシミュレーション結果を示す図である。尚、シミュレーションに用いた点光

源は図3 (a) に示す点光源と同様であり、他のシミュレーション条件も図3 (a) ~ (c) に示す場合と同様である。すなわち、レンズ開口数NAが0.6であり、距離S (図2 (a) 参照) が0.8であり、斜入射角 ϕ が $\sin \phi = S \times NA = 0.48$ である斜入射露光を用いた。

【0098】

図5 (a) に示すように、3個のマスクエンハンサー110が等間隔 (パターン間距離R) で並列的に配置されている。各マスクエンハンサー110は、その外形形状を有する半遮光部111と、マスクエンハンサー110の中央部に半遮光部111によって取り囲まれるように設けられた位相シフター112とから構成される。ここで、マスクエンハンサー110の幅 (パターン幅) をL、位相シフター112の幅 (開口幅) をWとすると、 $W/L = 0.4$ である。

【0099】

図5 (b) においては、パターン間距離Rを変化させた場合における、3個のマスクエンハンサー110のうちの中央に位置するマスクエンハンサー110によるDOF特性を示している。図4 (b) に示すDOF特性と同様に、図5 (b) に示すDOF特性においても、ピッチP、つまりパターン間距離 (正確には各マスクエンハンサー110の位相シフター111同士の間隔) Rが $\lambda / (2 \times \sin \phi)$ (シミュレーション条件では約 $0.20 \mu\text{m}$) 又はその近傍の値のときに、DOF特性が局所的に良くなる。また、図5 (b) に示すように、パターン間距離Rが、 $\lambda / (2 \times \sin \phi)$ (約 $0.20 \mu\text{m}$) に $\lambda / (\sin \phi + NA)$ (約 $0.18 \mu\text{m}$) の倍数を加えた値である場合にもDOFの極大値が現れている。

【0100】

すなわち、3個のマスクエンハンサー110が配置されてなるパターンに対して斜入射露光を行なう場合、パターン間距離Rが $\lambda / (2 \times \sin \phi)$ (約 $0.20 \mu\text{m}$) であるとDOFの極大値が発生する。さらに、パターン間距離Rが $\lambda / (2 \times \sin \phi) + n \times \lambda / (\sin \phi + NA)$ (n は自然数) であってもDOFの極大値が得られる。これは、無限周期的に配置されたマスクエンハンサーからなるパターンに対して斜入射露光を行なう場合における、デフォーカスに起

因して 0 次回折光及び 1 次回折光のそれぞれに生じる位相ズレ（位相変化）が同期する回折現象と、0 次回折光及び 1 次回折光の結像に反対位相の高次回折光が干渉する現象とが原因となって起こると考えられる。従って、前述の DOF の極大値が得られるパターン間距離 R を表す関係式は一般的に成り立つものと推測される。

【0101】

以上に説明したことから、本願発明者は、図 1 (a) に示す本実施形態のフォトマスクにおける主パターン 101 として、マスクエンハンサー 110 のように、位相シフターを有するパターンを用いる場合、補助パターン 102 として、露光により転写されず且つ回折光を発生させるパターン（回折光発生パターン）を所定の位置に配置することにより、露光によって主パターン 101 が転写される時の DOF 特性を大幅に向上させることができることを見出した。ここで、所定の位置とは、主パターン 101 の位相シフター 101B（つまりマスクエンハンサー 110 の位相シフター 111B）の中心から、 $\lambda / (2 \times \sin \phi) + n \times \lambda / (\sin \phi + NA)$ （n は正の整数）だけ離れた位置である。

【0102】

図 6 (a) ～ (c) は、マスクエンハンサーよりなる主パターンの DOF 特性が大幅に向上するように回折光発生パターン（補助パターン）が配置されてなる本発明のマスクパターンをそれぞれ示す平面図である。

【0103】

図 6 (a) に示すように、半遮光部 111 の内部に位相シフター 112（幅：W）が設けられてなるマスクエンハンサー 110（幅：L）における位相シフター 112 の中心から例えば $\lambda / (2 \times \sin \phi)$ 離れた位置に、露光により転写されない寸法を持つ半遮光部からなる第 1 次回折光発生パターン（第 1 の補助パターン）113（幅：D）を配置することによって、マスクエンハンサー 110 の DOF 特性が向上する。

【0104】

また、図 6 (b) に示すように、半遮光部 111 の内部に位相シフター 112 が設けられてなるマスクエンハンサー 110 における位相シフター 112 の中心

から例えば $\lambda / (2 \times \sin \phi) + \lambda / (\sin \phi + NA)$ 離れた位置に、露光により転写されない寸法を持つ半遮光部からなる第2次回折光発生パターン（第2の補助パターン）114（幅：D）を配置することによって、マスクエンハンサー110のDOF特性が向上する。

【0105】

さらに、本願発明者は、DOF向上効果が回折光によって発生するという理由から、図6（c）に示すように、図6（a）に示す補助パターンと図6（b）に示す補助パターンとを合成することによって、マスクエンハンサー110のDOF特性が大幅に向上することを見出した。すなわち、マスクエンハンサー110の位相シフター112の中心から $\lambda / (2 \times \sin \phi)$ 離れた位置に第1次回折光発生パターン113を配置すると共に位相シフター112の中心から $\lambda / (2 \times \sin \phi) + \lambda / (\sin \phi + NA)$ 離れた位置に第2次回折光発生パターン114を配置することによって、DOF特性の向上効果がより大きくなる。

【0106】

尚、図示は省略しているが、第2の補助パターン114の中心から（マスクエンハンサー110から遠ざかる方向に） $\lambda / (\sin \phi + NA)$ 離れた位置に、露光により転写されない寸法を持つ半遮光部からなる第3の回折光発生パターン（第3の補助パターン）を配置することも好ましい。同様に、第3の補助パターンの中心から $\lambda / (\sin \phi + NA)$ の倍数ずつ離れた位置に、露光により転写されない寸法を持つ半遮光部からなる第4、第5、第6・・・の回折光発生パターンを補助パターンとして配置することも好ましい。

【0107】

次に、回折光発生パターンを前述の所定の位置に配置することの効果を実シミュレーションにより確認する前に、半遮光部により回折光発生パターン（補助パターン）を構成することの効果の説明する。

【0108】

前述のように、回折光発生パターンを付加することによりマスクエンハンサーのDOF特性が大きく向上する。しかしながら、回折光発生パターンには回折光を発生させる作用のみが求められており、露光によって回折光発生パターンに対

応するパターンが形成されてしまったのでは、本来目的としているパターン（マスクエンハンサーのみに対応するパターン）を形成できない。すなわち、回折光発生パターンは、回折光を発生させるパターンであって、且つレジストに非感光領域を形成するのに十分な遮光効果を生じないパターンでなければならない。本実施形態では、このような回折光を発生させる作用のみを持つパターンを補助パターンとして使用する。そのためには、例えば、非常に微細な遮光パターンを回折光発生パターンとして用いる方法があるが、微細な遮光パターンの形成はマスク作成プロセスを困難にする。それに対して、透光部（開口部）と同じ位相で光を透過させる半遮光パターンを用いることは好ましいものと考えられる。通常、半遮光パターンはその遮光効果が低いので、微細なパターンを形成するために、半遮光パターンをマスクパターンとして用いることは不適切である。しかしながら、前述のように本実施形態のマスクエンハンサーによると、半遮光パターン（半遮光部）内に位相シフター（開口部）を形成することによって、微細パターン形成が可能となる。言い換えると、半遮光パターンにおける所望のパターン（形成しようとするパターン）に対応する部分のみに位相シフターを設けてマスクエンハンサー構造とすることにより、該部分の遮光性を強くして該部分を、レジストに所望の微細な非感光部を形成するためのマスクパターンとする。一方、回折光発生パターンは半遮光パターンのみから構成することによって、レジストに非感光部を形成しない補助パターンを容易に実現できる。すなわち、半遮光部及び位相シフからなるマスクエンハンサーと、半遮光部のみからなる補助パターンとをマスク上で組み合わせて用いることは、補助パターンを有するマスクによって微細パターンを形成する場合における最適な方法である。

【 0 1 0 9 】

ここで、本願発明者が、位相シフター及び半遮光パターンのそれぞれの遮光性を比較した結果について説明する。図 7（a）は、位相シフターのみが設けられたマスク、及び該マスクに対して露光を行なった場合に生じる光強度分布を示している。具体的には、図 7（a）に示すマスクは、透過性基板 1 6 0 の上に線幅 L の位相シフター 1 6 1 が形成されてなる。また、図 7（a）に示す光強度分布は、位相シフター 1 6 1 の幅方向における光強度分布であって、I a は該光強度

分布における位相シフター 161 の中心と対応する光強度である。図 7 (b) は、半遮光パターンのみが設けられたマスク、及び該マスクに対して露光を行なった場合に生じる光強度分布を示している。具体的には、図 7 (b) に示すマスクは、透過性基板 170 の上に線幅 L の半遮光パターン 171 が形成されてなる。また、図 7 (b) に示す光強度分布は、半遮光パターン 171 の幅方向における光強度分布であって、 I_b は該光強度分布における半遮光パターン 171 の中心と対応する光強度である。図 7 (c) は、図 7 (a) 及び図 7 (b) のそれぞれに示すマスクに対して線幅 L を変化させながら所定の条件で露光を行なった場合における、遮光性（具体的には光強度 I_a 及び I_b ）の変化をシミュレーションにより計算した結果を示している。ここで、露光条件は、光源が ArF（波長 $\lambda = 193 \text{ nm}$ ）光源であり、レンズ開口数 NA が 0.6 である。尚、図 7 (c) においては、光強度を、露光光の光強度を 1 とする相対的な強度を用いて表している。

【0110】

図 7 (c) に示すように、位相シフターを用いた場合、線幅 L が 90 nm で光を完全に遮光する効果が生じる。一方、線幅 L が 90 nm の半遮光パターンを用いた場合における光強度 I_b は 0.45 程度である。通常、実用的な露光条件においてレジストが感光する臨界光強度が 0.35 以下であることを考慮すると、ポジ型レジストプロセスにおいては線幅 L が 90 nm 程度の半遮光パターンによってレジストパターン（レジストの非感光部）が形成されないことが分かる。従って、回折光発生パターンに半遮光パターンのみを用いることにより、該回折光発生パターンを、露光により転写されない補助パターンとして容易に形成することができる。

【0111】

次に、図 6 (a) ~ (c) に示す位置に回折光発生パターンを配置することによって、マスクエンハンサーよりなる主パターンについて良好な DOF 特性が得られることを、本願発明者がシミュレーションによって実証した結果について説明する。図 8 (a) は、シミュレーションにおいて用いたパターン（マスクパターン）を示す図である。具体的には、図 8 (a) に示すように、半遮光部 111

の内部に位相シフター 1 1 2 が設けられてなるマスクエンハンサー 1 1 0 における位相シフター 1 1 2 の中心から距離 X 離れた位置に、露光により転写されない寸法を持つ半遮光部からなる第 1 次回折光発生パターン（第 1 の補助パターン）1 1 3 が配置されている。また、第 1 次回折光発生パターン 1 1 3 の中心から（マスクエンハンサー 1 1 0 から遠ざかる方向に）距離 Y 離れた位置に、露光により転写されない寸法を持つ半遮光部からなる第 2 次回折光発生パターン（第 2 の補助パターン）1 1 4 が配置されている。ここで、マスクエンハンサー 1 1 0 の幅を L 、位相シフター 1 1 2 の幅を W 、第 1 次回折光発生パターン 1 1 3 及び第 2 次回折光発生パターン 1 1 4 の幅を D とする。図 8 (b) は、図 8 (a) に示すパターンによる DOF 特性のシミュレーション結果を示す図である。具体的には、図 8 (b) は、図 8 (a) に示すパターンに対して距離 X 及び距離 Y を色々変化させながら露光を行なった場合における、マスクエンハンサー 1 1 0 に対応して形成されるパターンの DOF をシミュレーションにより求め、その結果を距離 X 及び距離 Y についてマッピングした図である。尚、シミュレーション条件は、 $L = 100 \text{ nm}$ 、 $W = 60 \text{ nm}$ 、 $D = 70 \text{ nm}$ 、光源 (ArF 光源) の波長 $\lambda = 193 \text{ nm}$ 、レンズ開口数 $NA = 0.6$ 、 $\sin \phi$ (ϕ : 斜入射角) $= 0.8 \times NA$ とした。また、第 1 次回折光発生パターン 1 1 3 及び第 2 次回折光発生パターン 1 1 4 のそれぞれを構成する半遮光部の透過率を 6% としていると共に、マスクエンハンサー 1 1 0 に対応して形成されるパターンの寸法 (幅) を 100 nm としている。また、図 8 (b) において、等高線は DOF を表していると共に、点 A は、距離 $X = \lambda / (2 \times \sin \phi)$ (約 $0.20 \mu\text{m}$)、距離 $Y = \lambda / (\sin \phi + NA)$ (約 $0.18 \mu\text{m}$) の点を表している。図 8 (b) に示すように、点 A において DOF のほぼ最大値が得られていることが分かる。すなわち、図 6 (c) に示すマスクにより、良好な DOF 特性が得られることが実証できた。

【0 1 1 2】

また、図 6 (a) ~ (c) に示す位置に回折光発生パターンを配置することによって DOF を最大にできることが、任意の光学条件でも成り立つことを証明するために、本願発明者が図 8 (a) に示すパターンを用いて異なる光学条件で同

様のシミュレーションを行なった結果について説明する。

【0113】

図9 (a) は、レンズ開口数 $NA = 0.6$ 、 $\sin \phi = 0.7 \times NA$ の光学条件（その他の条件は図8 (b) と同様）を用いた場合におけるDOF特性のシミュレーション結果を示す図である。図9 (a) において、点Aは、距離 $X = \lambda / (2 \times \sin \phi)$ (約 $0.23 \mu m$)、距離 $Y = \lambda / (\sin \phi + NA)$ (約 $0.19 \mu m$) の点を表している。図9 (a) に示すように、点AにおいてDOFのほぼ最大値が得られていることが分かる。

【0114】

図9 (b) は、レンズ開口数 $NA = 0.6$ 、 $\sin \phi = 0.6 \times NA$ の光学条件（その他の条件は図8 (b) と同様）を用いた場合におけるDOF特性のシミュレーション結果を示す図である。図9 (b) において、点Aは、距離 $X = \lambda / (2 \times \sin \phi)$ (約 $0.268 \mu m$)、距離 $Y = \lambda / (\sin \phi + NA)$ (約 $0.20 \mu m$) の点を表している。図9 (b) に示すように、点AにおいてDOFのほぼ最大値が得られていることが分かる。

【0115】

図9 (c) は、レンズ開口数 $NA = 0.7$ 、 $\sin \phi = 0.7 \times NA$ の光学条件（その他の条件は図8 (b) と同様）を用いた場合におけるDOF特性のシミュレーション結果を示す図である。図9 (c) において、点Aは、距離 $X = \lambda / (2 \times \sin \phi)$ (約 $0.196 \mu m$)、距離 $Y = \lambda / (\sin \phi + NA)$ (約 $0.162 \mu m$) の点を表している。図9 (c) に示すように、点AにおいてDOFのほぼ最大値が得られていることが分かる。

【0116】

以上の説明においては、点光源を用いた場合を前提としてきたが、以下、面積を有する光源を用いた場合における、回折光発生パターンによるDOF特性の向上効果をシミュレーションにより評価した結果について説明する。図10 (a) ~ (c) はそれぞれ、シミュレーションにおいて用いたパターン（マスクパターン）を示す図である。

【0117】

具体的には、図10(a)に示すマスクパターンは、幅Lのマスクエンハンサー110のみからなる。ここで、マスクエンハンサー110は、その外形形状を有する半遮光部111と、マスクエンハンサー110の中央部に半遮光部111によって取り囲まれるように設けられた位相シフター112(幅W)とから構成される。図10(b)に示すマスクパターンは、図10(a)に示すマスクエンハンサー110に、 $\sin \theta = 2 \times \sin \phi$ (ϕ : 斜入射角)で表される角度 θ で回折する回折光を発生させる第1次回折光発生パターン113が付加されたものである。ここで、第1次回折光発生パターン113は半遮光パターンであり、その幅はDである。図10(c)に示すマスクパターンは、図10(b)に示すマスクエンハンサー110及び第1次回折光発生パターン113に、 $\sin \eta = 2 \times (NA + \sin \phi)$ (ϕ : 斜入射角、NA: レンズ開口数)で表される角度 η で回折する回折光を発生させる第2次回折光発生パターン114が付加されたものである。ここで、第2次回折光発生パターン114は半遮光パターンであり、その幅はDである。

【0118】

図10(d)はシミュレーションに用いた光源、具体的には輪帯光源を示す図である。図10(d)に示すように、輪帯光源の外径及び内径はそれぞれ0.8及び0.6(レンズ開口数NAにより規格化している)である。この場合、斜入射露光の斜入射角 ϕ に関して、 $0.6 \times NA < \sin \phi < 0.8 \times NA$ が成り立つ。そこで、第1次回折光発生パターン113及び第2次回折光発生パターン114の配置を決めるための斜入射角 ϕ としてはその主成分、つまり $\sin \phi = NA \times (0.6 + 0.8) / 2 = 0.7 \times NA$ で表される斜入射角 ϕ を用いるものとする。

【0119】

図10(e)は、図10(a)～(c)のそれぞれに示すマスクパターンに対して所定の条件で露光を行なった場合に各マスクエンハンサー110に対応して生じる光強度分布のシミュレーション結果を示す図である。また、図10(f)は、図10(a)～(c)のそれぞれに示すマスクパターンに対して所定の条件で露光を行なって、各マスクエンハンサー110と対応する幅0.1 μ mのパタ

ーンを形成した場合における該パターンのCDのデフォーカス特性をシミュレーションした結果を示す図である。ここで、CDとはクリティカルディメンジョンのことであって、パターンの仕上がり寸法を表している。尚、シミュレーション条件は、 $L=180\text{ nm}$ 、 $W=60\text{ nm}$ 、 $D=90\text{ nm}$ 、光源（ArF光源）の波長 $\lambda=193\text{ nm}$ 、レンズ開口数 $NA=0.6$ 、 $\sin\phi=0.7\times NA=0.42$ である。また、第1次回折光発生パターン113及び第2次回折光発生パターン114のそれぞれを構成する半遮光部の透過率を6%としている。尚、図10(e)及び図10(f)において、線の種類を示す(a)、(b)及び(c)はそれぞれ図10(a)、図10(b)及び図10(c)に示すマスクパターンと対応する。

【0120】

図10(e)に示すように、図10(a)～(c)に示す全てのマスクパターンによって、つまりマスクエンハンサー110を持つマスクパターンによって、非常にコントラストの高い像（光強度分布）が形成されている。また、各光強度分布における $0.1\text{ }\mu\text{ m}$ のパターンの形成に関わる部分は、第1次回折光発生パターン113及び第2次回折光発生パターン114の影響を殆ど受けていない。このとき、 $0.1\text{ }\mu\text{ m}$ （ 100 nm ）のパターンの形成における臨界光強度は0.2程度であるので、第1次回折光発生パターン113及び第2次回折光発生パターン114が解像されてレジストに転写されないことが分かる。

【0121】

また、図10(f)に示すように、第1次回折光発生パターン113及び第2次回折光発生パターン114をマスクパターンに付加することによって、マスクエンハンサー110のデフォーカス特性が飛躍的に向上する。すなわち、位相シフター112が設けられたマスクエンハンサー110を、第1次回折光発生パターン113及び第2次回折光発生パターン114と共に使用することによって、デフォーカス特性の優れたパターン形成が可能になる。

【0122】

次に、前述のように理論的に導かれた、デフォーカス特性を最適化する回折光発生パターンの配置位置の算出方法が正しいことを、本願発明者がシミュレーシ

ョンにより実証した結果について説明する。具体的には、図10(b)又は図10(c)に示すマスクパターンにおいて回折光発生パターン113又は114の位置を変化させた場合における、マスクエンハンサー110に対応して形成される幅 $0.1\mu\text{m}$ のラインパターンのDOFの値をシミュレーションにより求めた。ここで、DOFは、ラインパターンの幅が $0.1\mu\text{m}$ から $0.09\mu\text{m}$ まで変化するデフォーカス範囲である。また、シミュレーション条件は、図10(e)及び(f)の場合と同様である。

【0123】

図11(a)は、図10(b)に示すマスクパターンにおいて第1次回折光発生パターン113が位相シフター112の中心から距離P1離れた位置に配置されている様子を示す図である。また、図11(b)は、図11(a)に示すマスクパターンに対して距離P1を変化させながら露光を行なった場合における、前述のDOFの変化を示す図である。図11(b)に示すように、距離P1が、理論式 $\lambda / (2 \times \sin \phi)$ により求められる約 230nm のときにDOFの値がほぼピークになっている。

【0124】

図11(c)は、図10(c)に示すマスクパターンにおいて第2次回折光発生パターン114が第1次回折光発生パターン113の中心から距離P2離れた位置に配置されている様子を示す図である。ここで、位相シフター112と第1次回折光発生パターン113との間の距離は $\lambda / (2 \times \sin \phi)$ (約 230nm)である。また、図11(d)は、図11(c)に示すマスクパターンに対して距離P2を変化させながら露光を行なった場合における、前述のDOFの変化を示す図である。図11(d)に示すように、距離P2が、理論式 $\lambda / (\sin \phi + \text{NA})$ により求められる約 190nm のときにDOFの値がほぼピークになっている。

【0125】

以上に説明したように、位相シフター又はマスクエンハンサーに対して、光源(レンズ中心を通る法線から距離Sだけ離れている光源)の波長が λ 、レンズ開口数がNAの露光機によって斜入射露光を行なう場合、回折光発生パターンを次

のように配置することによって、位相シフター又はマスクエンハンサーに対応して形成されるパターンのDOF特性を最適化することが可能となる。すなわち、位相シフター又はマスクエンハンサーの中心から $\lambda / (2 \times \sin \phi)$ 離れた位置に第1次回折光発生パターンを配置すると共に第1次回折光発生パターンの中心から $\lambda / (\sin \phi + NA)$ 離れた位置に第2次回折光発生パターンを配置する。

【0126】

以上の説明において回折光発生パターンの最適な配置位置を示してきたが、続いて、回折光発生パターンの配置位置の許容範囲について説明する。図5(b)に示すように、回折光発生パターンの最適配置位置同士の間にはDOFが最低となる位置（以下、最悪配置位置と称する）が存在する。ここで、最適配置位置と最悪配置位置との中間位置を、平均的なDOF向上効果が得られる位置（以下、平均配置位置と称する）と定義すると、最適配置位置を挟む一对の平均配置位置の間に回折光発生パターンが収まっていることが好ましい。あるいは、最適配置位置とそれを挟む一对の平均配置位置のそれぞれとの中間位置同士の間回折光発生パターンの中心が収まっていることがさらに好ましい。

【0127】

具体的に説明すると、第2次回折光発生パターンの最適配置位置は、第1次回折光発生パターンの中心から $\lambda / (\sin \phi + NA)$ 離れた位置である。この位置を点OPと呼ぶと、点OPの両側における最悪配置位置は、点OPから両側に $(\lambda / (\sin \phi + NA)) / 2$ 離れた位置である。また、点OPの両側における平均配置位置は、点OPから両側に $(\lambda / (\sin \phi + NA)) / 4$ 離れた位置である。この一对の平均配置位置に挟まれた領域に第2次回折光発生パターンが収まるのが好ましいとすると、第1次回折光発生パターンの中心からの距離が $(\lambda / (\sin \phi + NA)) \times (3/4) \sim (\lambda / (\sin \phi + NA)) \times (5/4)$ の範囲に第2次回折光発生パターンが収まっていることが好ましい。図11(c)の場合と同様の条件下で数値換算を行なった場合、第1次回折光発生パターンの中心からの距離が143～238nmの範囲に第2次回折光発生パターンが収まっていることが好ましい。

【0128】

また、第2次回折光発生パターンの最適配置位置とそれを挟む一对の平均配置位置のそれぞれとの中間位置は、点OPから両側に $(\lambda / (\sin \phi + NA)) / 8$ 離れた位置である。ここで、第2次回折光発生パターンがレジストパターンを形成しない補助パターンであり、且つ最適配置位置を挟む前述の一对の中間位置同士の間第2次回折光発生パターンの中心が存在することが最も好ましい。すなわち、第1次回折光発生パターンの中心からの距離が $(\lambda / (\sin \phi + NA)) \times (7/8) \sim (\lambda / (\sin \phi + NA)) \times (9/8)$ の範囲に第2次回折光発生パターンの中心が存在することが好ましい。図11(c)の場合と同様の条件下で数値換算を行なった場合、第1次回折光発生パターンの中心からの距離が166～214 nmの範囲に第2次回折光発生パターンの中心が存在することが好ましい。

【0129】

第1次回折光発生パターンについても、第2次回折光発生パターンと同様に、第1次回折光発生パターンの最適配置位置の両側に $(\lambda / (\sin \phi + NA)) / 4$ 離れた一对の平均配置位置に挟まれた領域に第1次回折光発生パターンが収まることが好ましい。あるいは、第1次回折光発生パターンの最適配置位置とそれを挟む一对の平均配置位置のそれぞれとの中間位置、つまり第1次回折光発生パターンの最適配置位置の両側に $(\lambda / (\sin \phi + NA)) / 8$ 離れた一对の中間位置に挟まれた領域に第1次回折光発生パターンの中心が収まることが好ましい。

【0130】

具体的には、第1次回折光発生パターンは、位相シフターの中心からの距離が $\lambda / (2 \times \sin \phi) - (\lambda / (\sin \phi + NA)) / 4$ から $\lambda / (2 \times \sin \phi) + (\lambda / (\sin \phi + NA)) / 4$ までの範囲に収まっていることが好ましい。図11(a)の場合と同様の条件下で数値換算を行なった場合、第1次回折光発生パターンは、位相シフターの中心からの距離が183～278 nmの範囲に収まっていることが好ましい。あるいは、第1次回折光発生パターンの中心は、位相シフターの中心からの距離が $\lambda / (2 \times \sin \phi) - (\lambda / (\sin \phi +$

$NA)) / 8$ から $\lambda / (2 \times \sin \phi) + (\lambda / (\sin \phi + NA)) / 8$ までの範囲に存在することが好ましい。図 1 1 (a) の場合と同様の条件下で数値換算を行なった場合、第 1 次回折光発生パターンの中心は、位相シフターの中心からの距離が 206 ~ 254 nm の範囲に存在することが好ましい。

【 0 1 3 1 】

尚、以上に述べた、第 2 次回折光発生パターンの配置位置の許容範囲についての考え方は、例えば図 6 (c) に示すような第 2 次回折光発生パターンまでが存在している場合に限られるものではない。すなわち、第 3 次回折光発生パターンや第 4 次回折光発生パターン等が存在する場合には、第 2 次回折光発生パターンの場合と同様に定義される配置位置の許容範囲に第 3 次回折光発生パターンや第 4 次回折光発生パターン等が配置されることが好ましい。

【 0 1 3 2 】

また、以上の説明においては、マスクエンハンサーの両側に回折光発生パターンが存在する場合を対象としてきた。しかし、マスクエンハンサーの一側方に、具体的には、回折光発生パターンの最適配置位置と対応する位置に他の主パターンが存在する場合、マスクエンハンサーの他側方のみに補助パターンとなる回折光発生パターンを配置してもよい。

【 0 1 3 3 】

(第 2 の実施形態)

以下、本発明の第 2 の実施形態に係るフォトマスクについて図面を参照しながら説明する。

【 0 1 3 4 】

図 1 2 は第 2 の実施形態に係るフォトマスクの平面図である。

【 0 1 3 5 】

図 1 2 に示すように、透過性基板 200 の上には、露光により転写される主パターン 201 が設けられている。主パターン 201 は、露光光を部分的に透過させる第 1 の透過率を有する第 1 の半遮光部 201 A と、位相シフター 201 B とから構成されている。第 1 の半遮光部 201 A は、主パターン 201 の外形形状を有している。位相シフター 201 B は、主パターン 201 の周縁部に、第 1 の

半遮光部 201A によって囲まれるように設けられている。位相シフター 201B は、例えば透過性基板 200 を掘り下げることによって形成される。透過性基板 200 上における主パターン 201 の位相シフター 201B の中心から $\lambda / (2 \times \sin \phi)$ 離れた位置には、露光光を回折させ且つ露光により転写されない第 1 の補助パターン 202 が、主パターン 201 との間に透光部を挟むように設けられている。また、透過性基板 200 上における第 1 の補助パターン 202 の中心から（主パターン 201 から遠ざかる方向に） $\lambda / (NA + \sin \phi)$ 離れた位置には、露光光を回折させ且つ露光により転写されない第 2 の補助パターン 203 が、第 1 の補助パターン 202 との間に透光部を挟むように設けられている。ここで、第 1 の補助パターン 202 及び第 2 の補助パターン 203 は、露光光を部分的に透過させる第 2 の透過率を有する第 2 の半遮光部から構成されている。

【0136】

ここで、本実施形態における位相シフター配置の特徴について説明する。まず、形成したいパターンの寸法が $0.3 \times \lambda / NA$ 以下である場合、該パターンと対応する半遮光部（半遮光パターン）の中心に位相シフターを配置することが好ましい。また、形成したいパターンの寸法が λ / NA 以上である場合、該パターンと対応する半遮光パターンの周縁部に位相シフターを配置することが好ましい。また、形成したいパターンの寸法が $0.3 \times \lambda / NA$ よりも大きく且つ λ / NA よりも小さい場合、位相シフターを、該パターンと対応する半遮光パターンの中心に配置してもよいし又はその周縁部に配置してもよい。

【0137】

λ / NA 以上の寸法を持つパターンを形成するためのマスクパターン部分における周縁部に位相シフターを配置する理由は、後述する「輪郭強調法」によるパターン形成特性の向上効果を得るためであると共に、回折光発生パターンを最適な位置に配置できるようにするためである。具体的には、位相シフターは、半遮光パターンの外周からの距離が $\lambda / (2 \times \sin \phi)$ 以下の範囲に存在することが好ましい。すなわち、第 1 次回折光発生パターンを配置するためには、位相シフターが、半遮光パターン（主パターン）における外周からの距離が $\lambda / (2 \times$

$\sin \phi$) 以下の位置に存在する必要があるからである。また、 $\sin \phi$ の最大値が NA であることを考慮すると、 λ/NA 以上の寸法を持つ半遮光パターンの場合、その周縁部に位相シフターを配置することが好ましいということになる。

【0138】

図12に示すフォトマスクにおいては、主パターン201、第1の補助パターン202及び第2の補助パターン203からマスクパターンが構成されている。また、透過性基板200における該マスクパターンが形成されていない部分が透光部（開口部）である。

【0139】

また、位相シフター201Bを透過する光と、透光部を透過する光とは反対位相の関係（具体的には両者の位相差が $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）となる関係）にある。

【0140】

また、第1の半遮光部201A及び第2の半遮光部（第1及び第2の補助パターン202及び203）のそれぞれを透過する光と、透光部を透過する光とは同位相の関係（具体的には両者の位相差が $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）となる関係）にある。

【0141】

第2の実施形態によると、主パターン201が第1の半遮光部201Aと位相シフター201Bとから構成されているため、位相シフター201Bを透過した光によって透光部及び第1の半遮光部201Aを透過した光の一部分を打ち消すことができる。このため、主パターン201と対応する遮光像における光強度分布のコントラストを強調できる。

【0142】

また、第2の実施形態によると、主パターン201とは別に、低透過率の第1及び第2の補助パターン202及び203が設けられている。具体的には、主パターン201の位相シフター201Bの中心から $\lambda/(2 \times \sin \phi)$ 離れた位置に第1の補助パターン（第1次回折光発生パターン）202が設けられている。また、第1の補助パターン202の中心から $\lambda/(NA + \sin \phi)$ 離れた位

置に第2の補助パターン（第2次回折光発生パターン）203が設けられている。このため、主パターン201の位相シフター201Bを透過した光と干渉する回折光を確実に発生させることができる。従って、主パターン201の転写像におけるデフォーカス特性が向上し、その結果、DOF特性が向上する。

【0143】

また、第2の実施形態によると、第1及び第2の補助パターン202及び203が半遮光部であるため、補助パターン配置の自由度が向上し、それにより主パターン201を含めたパターン配置における周期性を高めることができるので、DOF特性がより一層向上する。また、第1及び第2の補助パターン202及び203が半遮光部であるため、露光により転写されないという条件下で各補助パターンを太くできるので、その加工が容易になる。

【0144】

また、第2の実施形態によると、位相シフター201Bが主パターン201の周縁部に配置されているため、透光部を透過した光の像の主パターン201の近傍における光強度分布のコントラストを強調できるので、デフォーカス特性を良好に保ちながらパターン形成を行なうことができる。

【0145】

また、第2の実施形態によると、位相シフター201Bが、透過性基板200を掘り下げることにより形成されているため、パターン形成において非常に優れたデフォーカス特性が発揮される。

【0146】

尚、第2の実施形態において、第1及び第2の補助パターン202及び203のうちのいずれか一方だけを配置してもよい。

【0147】

また、第2の実施形態において、主パターン201を構成する第1の半遮光部201Aの第1の透過率は6%以上で且つ15%以下であることが好ましい。このようにすると、パターン形成時におけるレジスト膜の膜減り防止又はレジスト感度の最適化を達成できると共に、それらの効果と、DOF向上効果及びコントラスト向上効果とを両立させることができる。

【0148】

また、第2の実施形態において、第1及び第2の補助パターン202及び203（つまり第2の半遮光部）の第2の透過率は6%以上で且つ50%以下であることが好ましい。このようにすると、各補助パターンの透過率が高すぎることで、レジストの非感光部が形成されてしまうことを防止しつつ、回折光によるDOF向上効果を確実に実現できる。

【0149】

また、第2の実施形態において、第1の半遮光部201Aと、第1及び第2の補助パターン202及び203となる第2の半遮光部とは同一の半遮光膜、例えば透過性基板200上に形成された金属薄膜から形成されていてもよい。この場合、各半遮光部を簡単に形成できるので、フォトリソ加工を容易に行なうことができる。前述の金属薄膜としては、Cr（クロム）、Ta（タンタル）、Zr（ジルコニウム）、Mo（モリブデン）若しくはTi（チタン）等の金属又はそれらの合金からなる薄膜（厚さ50nm程度以下）を用いることができる。具体的な合金材料としては、Ta-Cr合金、Zr-Si合金、Mo-Si合金又はTi-Si合金等がある。また、金属薄膜に代えて、ZrSiO₄、CrAlO₃、TaSiO₃、MoSiO₃又はTiSiO₃等のシリコン酸化物を含有する厚膜を用いてもよい。

【0150】

また、第2の実施形態において、透過性基板200上に、透過率の高い材料からなる位相シフター膜を形成することにより、位相シフター201Bを形成してもよい。

【0151】

次に、本願発明者により見出された、遮光パターン（主パターン201）の周縁部に位相シフター（位相シフター201B）が設けられた構造によって、孤立スペースパターンの解像度を向上させる方法（以下、輪郭強調法と称する）について説明する。ここで、「輪郭強調法」は、ポジ型レジストプロセスにおける微小スペースパターンであれば、その形状に関わらず全く同様に成り立つ原理である。以下、ポジ型レジストプロセスによりコンタクトパターンを形成する場合を

例として説明を行なう。但し、ネガ型レジストプロセスを用いる場合も、ポジ型レジストプロセスにおける微小スペースパターン（レジスト除去パターン）を微小パターン（レジストパターン）と置き換えて考えれば、輪郭強調法が同様に成り立つ。また、以下の説明においては、特に断らない限り、位相シフター部分以外の遮光パターンは半遮光部から構成されているものとする。

【0152】

例えば開口部を囲むように遮光パターンが設けられ且つ遮光パターンの周縁部に位相シフターが設けられたたフォトマスク（以下、輪郭強調マスクと称する）において、遮光パターンの周縁部つまり開口部（透光部）の周辺に配置された位相シフターを透過した光は、開口部及び半遮光部を透過した光の一部を打ち消すことができる。従って、位相シフターを透過する光の強度を、開口部を囲む領域（輪郭部）の光が打ち消されるように調整すれば、輪郭部の光強度がほぼ0に近い値まで減少した光強度分布を形成できる。また、位相シフターを透過する光は、輪郭部の光を強く打ち消す一方、開口部の中央付近の光を弱く打ち消す。その結果、輪郭強調マスクを透過した光の強度分布における、開口部からその周辺にかけてのプロファイルの傾きが増大するという効果も得られる。従って、輪郭強調マスクを透過した光の強度分布はシャープなプロファイルを有するようになるので、コントラストの高い光強度の像（イメージ）が形成される。これが、輪郭強調法において光強度のイメージを強調できる原理である。すなわち、低い透過率を有する半遮光部からなるマスクパターンにおける開口部の近傍に位相シフターを配置することにより、フォトマスクによって形成される光強度の像の中に、開口部の輪郭と対応する非常に強い暗部を形成することが可能となる。これによって、開口部の光強度とその周辺部分の光強度との間でコントラストが強調された光強度分布を形成できる。

【0153】

尚、輪郭強調法に用いる半遮光部の透過率は高い程好ましいが、半遮光部の存在に起因して、本来は遮光部となる領域に透過光が存在するようになるため、パターン形成時におけるレジスト膜（半遮光部と対応するレジストパターン）の膜減り防止又はレジスト感度の最適化等の観点から、半遮光部の透過率の最大値を

15%程度にしておくことが好ましい。一方、輪郭強調法による効果を得るためには、半遮光部の透過率の最小値を6%程度にしておくことが好ましい。従って、輪郭強調マスクにおける半遮光部の透過率の最適値は6%以上で且つ15%以下であると言える。また、輪郭強調マスクにおいて、位相シフターは開口部と接するように配置されていてもよいし又は開口部との間に半遮光部を挟むように配置されていてもよい。また、位相シフターは開口部の輪郭全体に沿って配置されていてもよいし又は該輪郭の一部分のみに沿って配置されていてもよい。

【0154】

また、遮光パターンとして、透光部と同じ位相で光を透過させる半遮光パターンを用いることにより、中心線強調法（第1の実施形態参照）と輪郭強調法とを同時に用いたマスクパターンの形成が可能となる。すなわち、微細なラインパターンを形成するための半遮光パターンには、その中心部に位相シフターを配置する。一方、大きなパターンを形成するための半遮光パターンには、その周縁部に位相シフターを配置する。これにより、大きなパターンの端部と対応する光強度の像のコントラストが輪郭強調法に従って向上するので、形成しようとする全てのパターンにおけるあらゆる部分について、光強度の像のコントラストが強調可能となる。このように、従来、パターン形成においてマスクパターンとして用いることが好ましくなかった半遮光パターン（透光部と同じ位相で光を透過させる半遮光部）によって、任意の形状のパターンの形成が可能となる。また、半遮光パターンつまり半遮光膜を用いることによって次のようなメリットも生じる。すなわち、従来マスクにおいては、遮光性を確保するためにマスクパターンとして厚い金属膜を用いなければならなかった。それに対して、半遮光パターンは、半遮光性を持つ薄い金属膜により形成が可能となるので、言い換えると、マスクパターンを形成するための金属膜が薄くなるので、マスクの加工が容易になる。具体的には、Cr膜を用いる場合、従来マスクのマスクパターンとしては100nm程度の厚さが必要であったが、半遮光パターンとしては10nm程度の厚さで十分である。このため、エッチングにより微細なマスクパターンを形成する場合にも又はマスクパターン形成後に洗浄等を行なう場合にも剥離等の不良が発生しなくなる。

【0155】

尚、第2の実施形態において、回折光発生パターン（第1及び第2の補助パターン202及び203）を用いて、マスクエンハンサー（主パターン201）内の開口部（位相シフター201B）を透過した光と干渉する回折光を発生させ、それによってパターン形成時のデフォーカス特性（DOF特性）を向上させることができる理由は、第1の実施形態と同様である。

【0156】

すなわち、半遮光部（第1の半遮光部201A）の周縁部に位相シフター（位相シフター201B）が配置された、輪郭強調法のマスクエンハンサー構造（図12参照）において、位相シフターにより囲まれた半遮光部は、レジストが感光されない程度の光しか透過させないが、光学的には透光部と同じである。従って、輪郭強調法の位相シフターも中心線強調法の位相シフターと同様の作用を生じるので、中心線強調法の場合と同様に、位相シフターの中心から $\lambda / (2 \times \sin \phi)$ 離れた位置に第1次回折光発生パターンを配置し、さらに（又は）第1次回折光発生パターンの中心から $\lambda / (NA + \sin \phi)$ 離れた位置に第2次回折光発生パターンを配置することによってデフォーカス特性を向上させることが可能となる。但し、輪郭強調法における、位相シフターの位置を基準とする回折光発生パターンの配置位置の許容範囲は、第1の実施形態で説明した、中心線強調法における回折光発生パターンの配置位置の許容範囲と同様である。

【0157】

（第3の実施形態）

以下、本発明の第3の実施形態に係るフォトマスクについて図面を参照しながら説明する。

【0158】

図13（a）は、第3の実施形態に係るフォトマスクの平面図であり、図13（b）は、図13（a）のXIII-XIII線における断面図である。

【0159】

図13（a）及び（b）に示すように、透過性基板300の上には、露光により転写されるライン状の主パターン301が設けられている。主パターン301

は第1の遮光部301Aと位相シフター301Bとから構成されている。第1の遮光部301Aは、ライン状の位相シフター301Bを取り囲むように形成されている。言い換えると、位相シフター301Bは主パターン301の中心部に配置されている。位相シフター301Bは、例えば透過性基板300を掘り下げることによって形成される。透過性基板300上における主パターン301の両側には、露光光を回折させ且つ露光により転写されない一对の補助パターン302が、主パターン301との間に透光部を挟むように設けられている。補助パターン302は第2の遮光部から構成されている。

【0160】

すなわち、第3の実施形態が第1の実施形態と異なる点は、遮光部及び位相シフターから構成されるマスクエンハンサーを用いていると共に、遮光部のみから構成される補助パターン（回折光発生パターン）を用いていることである。尚、図13（a）及び（b）に示すフォトマスクにおいては、主パターン301と補助パターン302とからマスクパターンが構成されている。また、透過性基板300における該マスクパターンが形成されていない部分が透光部（開口部）である。また、位相シフター301Bを透過する光と、透光部を透過する光とは反対位相の関係（具体的には両者の位相差が $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但しnは整数）となる関係）にある。

【0161】

第3の実施形態によると、主パターン301が位相シフター301Bを有するため、位相シフター301Bを透過した光によって透光部を透過した光の一部分を打ち消すことができる。このため、主パターン301と対応する遮光像における光強度分布のコントラストを強調できる。また、主パターン301とは別に補助パターン302が設けられているため、補助パターン302を適切な位置に配置することにより、主パターン301の位相シフター301Bを透過した光と干渉する回折光を発生させることができる。従って、主パターン301の転写像におけるデフォーカス特性が向上し、その結果、DOF特性が向上する。

【0162】

また、第3の実施形態によると、位相シフター301Bが、主パターン301

の外形形状を持つ第1の遮光部301Aの中心部に配置されているため、主パターン301と対応する遮光像の中心部における光強度分布のコントラストを強調できるので、デフォーカス特性を良好に保ちながら、例えば微細なラインパターンの形成を行なうことができる。

【0163】

また、第3の実施形態によると、位相シフター301Bが、透過性基板300を掘り下げることにより形成されているため、パターン形成において非常に優れたデフォーカス特性が発揮される。

【0164】

尚、第3の実施形態において、第1の遮光部301Aと、補助パターン302となる第2の遮光部とは同一の遮光膜、例えば透過性基板300上に形成されたCr（クロム）膜等の金属膜から形成されていてもよい。

【0165】

また、第3の実施形態において、透過性基板300上に、透過率の高い材料からなる位相シフター膜を形成することにより、位相シフター301Bを形成してもよい。

【0166】

ここで、本実施形態のように、透過性基板上に金属膜からなる遮光部を形成すると共に透過性基板を掘り下げて位相シフターを形成することによりフォトマスクが形成されている場合、マスク検査の容易なフォトマスクが実現されることを簡単に説明しておく。光に対して透過性を有する材料の透過率は光の波長に依存して変化する。このため、マスク検査において露光光と同じ波長を持つ光を使用しなければマスク検査を行なえない場合が起こる。すなわち、露光光に対して低い透過率を持つ材料について、露光光よりも大きい波長を持つ光を用いて検査を行なった場合、例えば該材料が検査光の波長に対しては非常に高い透過率を持ってしまい、その結果、マスクパターンの遮光性を検査することができなくなる場合がある。しかしながら、本実施形態のように、遮光部として、ほぼ完全に光を遮光できる、十分な膜厚の金属膜を用いた場合、該金属膜は、X線領域の波長を除くほとんどの光に対してほぼ完全な遮光膜となる。よって、露光光の波長とマ

スク検査装置の光の波長とが異なる場合であっても、本実施形態のようなフォトマスクに対してはマスク検査を容易に行なうことができる。

【0167】

(第3の実施形態の変形例)

以下、本発明の第3の実施形態の変形例に係るフォトマスクについて図面を参照しながら説明する。

【0168】

図14は、第3の実施形態の変形例に係るフォトマスクにおけるマスクパターンの平面図である。尚、図14において、図13(a)及び(b)に示す第3の実施形態に係るフォトマスクと同一の構成要素には同一の符号を付すことにより説明を省略する。

【0169】

本変形例の第1の特徴は、補助パターン302(幅:D)が、主パターン301(幅:L)の位相シフター301Bの中心から $(\lambda / (2 \times \sin \phi))$ 離れた位置に設けられていることである。

【0170】

また、本変形例の第2の特徴は、主パターン301の位相シフター301B(幅:W)の中心から $(\lambda / (2 \times \sin \phi)) + (\lambda / (NA + \sin \phi))$ 離れた位置に、言い換えると、補助パターン(以下、第1の補助パターンと称する)302の中心から $(\lambda / (NA + \sin \phi))$ 離れた位置に、露光光を回折させ且つ露光により転写されない第2の補助パターン303(幅:D)が、第1の補助パターン302との間に透光部を挟むように設けられていることである。第2の補助パターン303は、第1の補助パターン302と同様の遮光部から構成される。

【0171】

本変形例によると、第3の実施形態における回折光によるDOF向上効果を確実に実現できる。

【0172】

尚、本変形例において、第1の補助パターン302を配置しなくてもよい。

【 0 1 7 3 】

また、本変形例において、位相シフター 3 0 1 B と第 1 の補助パターン 3 0 2 との間の距離が $M \times (\lambda / (2 \times \sin \phi))$ の近傍の値であっても前述の効果がある程度生じる。

【 0 1 7 4 】

また、本変形例において、位相シフター 3 0 1 B と第 2 の補助パターン 3 0 3 との間の距離が $M \times (\lambda / (2 \times \sin \phi)) + (\lambda / (NA + \sin \phi))$ の近傍の値であっても前述の効果がある程度生じる。

【 0 1 7 5 】

ここで、前述の効果がある程度生じるという、第 1 の補助パターン 3 0 2 又は第 2 の補助パターン 3 0 3 の配置位置に関する前述の「近傍の値」とは、第 1 の実施形態で説明した、回折光発生パターンの配置位置の許容範囲のことである。

【 0 1 7 6 】

(第 4 の実施形態)

以下、本発明の第 4 の実施形態に係るフォトマスクについて図面を参照しながら説明する。

【 0 1 7 7 】

図 1 5 (a) は、第 4 の実施形態に係るフォトマスクの平面図であり、図 1 5 (b) は、図 1 5 (a) の XV-XV 線における断面図である。

【 0 1 7 8 】

図 1 5 (a) 及び (b) に示すように、透過性基板 4 0 0 の上には、露光により転写されるライン状の主パターン 4 0 1 が設けられている。主パターン 4 0 1 は位相シフターから構成されている。該位相シフターは、例えば透過性基板 4 0 0 を掘り下げることによって形成される。透過性基板 4 0 0 上における主パターン 4 0 1 の両側には、露光光を回折させ且つ露光により転写されない一对の補助パターン 4 0 2 が、主パターン 4 0 1 との間に透光部を挟むように設けられている。補助パターン 4 0 2 は、露光光を部分的に透過させる透過率を有する半遮光部から構成されている。

【 0 1 7 9 】

すなわち、第4の実施形態が第1の実施形態と異なる点は、主パターン401として、マスクエンハンサー構造に代えて位相シフターのための構造を用いていることである。尚、図15(a)及び(b)に示すフォトマスクにおいては、主パターン401と補助パターン402とからマスクパターンが構成されている。また、透過性基板400における該マスクパターンが形成されていない部分が透光部（開口部）である。

【0180】

また、主パターン401となる位相シフターを透過する光と、透光部を透過する光とは反対位相の関係（具体的には両者の位相差が $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）となる関係）にある。

【0181】

また、補助パターン402となる半遮光部を透過する光と、透光部を透過する光とは同位相の関係（具体的には両者の位相差が $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下（但し n は整数）となる関係）にある。

【0182】

第4の実施形態によると、主パターン301が位相シフターから構成されているため、該位相シフターを透過した光によって透光部を透過した光の一部分を打ち消すことができる。このため、主パターン401と対応する遮光像における光強度分布のコントラストを強調できる。また、主パターン401とは別に、低透過率の補助パターン402が設けられているため、補助パターン402を適切な位置に配置することにより、主パターン401である位相シフターを透過した光と干渉する回折光を発生させることができる。従って、主パターン401の転写像におけるデフォーカス特性が向上し、その結果、DOF特性が向上する。

【0183】

また、第4の実施形態によると、補助パターン402が半遮光部であるため、補助パターン配置の自由度が向上し、それにより主パターン401を含めたパターン配置における周期性を高めることができるので、DOF特性がより一層向上する。また、補助パターン402が半遮光部であるため、露光により転写されな

いという条件下で補助パターン402を太くできるので、その加工が容易になる。

【0184】

また、第4の実施形態によると、主パターン401となる位相シフターが、透過性基板400を掘り下げることにより形成されているため、パターン形成において非常に優れたデフォーカス特性が発揮される。

【0185】

尚、第4の実施形態においては、主パターン401が位相シフターのみからなるため、第1～第3の実施形態で用いたマスクエンハンサー構造による効果、つまり、マスクエンハンサーの寸法とそれに設けられる位相シフター（開口部）の寸法とを調整することによってコントラスト及びデフォーカス特性の両方を制御するという特有の効果は得られない。しかしながら、デフォーカス特性を向上させるだけであれば、マスクエンハンサーを、透過率が十分に高い位相シフターにより置換してもよい。

【0186】

また、第4の実施形態において、補助パターン402となる半遮光部の透過率は6%以上で且つ50%以下であることが好ましい。このようにすると、補助パターン402の透過率が高すぎることによってレジストの非感光部が形成されてしまうことを防止しつつ、回折光によるDOF向上効果を確実に実現できる。

【0187】

また、第4の実施形態において、透過性基板400上に、透過率の高い材料からなる位相シフター膜を形成することにより、主パターン401となる位相シフターを形成してもよい。

【0188】

（第4の実施形態の変形例）

以下、本発明の第4の実施形態の変形例に係るフォトマスクについて図面を参照しながら説明する。

【0189】

図16は、第4の実施形態の変形例に係るフォトマスクにおけるマスクパター

ンの平面図である。尚、図16において、図15(a)及び(b)に示す第4の実施形態に係るフォトマスクと同一の構成要素には同一の符号を付すことにより説明を省略する。

【0190】

本変形例の第1の特徴は、補助パターン402(幅:D)が、主パターン401(幅:W)つまり位相シフターの中心から $(\lambda / (2 \times \sin \phi))$ 離れた位置に設けられていることである。

【0191】

また、本変形例の第2の特徴は、主パターン401となる位相シフターの中心から $(\lambda / (2 \times \sin \phi)) + (\lambda / (NA + \sin \phi))$ 離れた位置に、言い換えると、補助パターン(以下、第1の補助パターンと称する)402の中心から $(\lambda / (NA + \sin \phi))$ 離れた位置に、露光光を回折させ且つ露光により転写されない第2の補助パターン403(幅:D)が、第1の補助パターン402との間に透光部を挟むように設けられていることである。第2の補助パターン403は、第1の補助パターン402と同様の半遮光部から構成される。

【0192】

本変形例によると、第4の実施形態における回折光によるDOF向上効果を確実に実現できる。

【0193】

尚、本変形例において、第2の補助パターン402を配置しなくてもよい。

【0194】

また、本変形例において、主パターン401となる位相シフターと第1の補助パターン402との間の距離が $M \times (\lambda / (2 \times \sin \phi))$ の近傍の値であっても前述の効果がある程度生じる。

【0195】

また、本変形例において、主パターン401となる位相シフターと第2の補助パターン403との間の距離が $M \times (\lambda / (2 \times \sin \phi)) + (\lambda / (NA + \sin \phi))$ の近傍の値であっても前述の効果がある程度生じる。

【0196】

ここで、前述の効果がある程度生じるという、第1の補助パターン402又は第3の補助パターン303の配置位置に関する前述の「近傍の値」とは、第1の実施形態で説明した、回折光発生パターンの配置位置の許容範囲のことである。

【0197】

(第5の実施形態)

以下、本発明の第5の実施形態に係るパターン形成方法、具体的には第1～第4の実施形態のいずれかに係るフォトマスク（以下、本発明のフォトマスク）を用いたパターン形成方法について図面を参照しながら説明する。

【0198】

図17(a)～(d)は第5の実施形態に係るパターン形成方法の各工程を示す断面図である。

【0199】

まず、図17(a)に示すように、基板500上に、金属膜又は絶縁膜等の被加工膜501を形成した後、図17(b)に示すように、被加工膜501の上に、ポジ型のレジスト膜502を形成する。

【0200】

次に、図17(c)に示すように、本発明のフォトマスク、例えば、図1(b)に示す第1の実施形態に係るフォトマスクに対して露光光503を照射し、該フォトマスクを透過した透過光504によってレジスト膜502を露光する。

【0201】

尚、図17(c)に示す工程で用いるフォトマスクの透過性基板100上には、露光により転写されるライン状の主パターン101が設けられている。主パターン101は、露光光を部分的に透過させる第1の透過率を有する第1の半遮光部101Aと、位相シフター101Bとから構成されている。第1の半遮光部101Aは、ライン状の位相シフター101Bを取り囲むように形成されている。位相シフター101Bは、例えば透過性基板100を掘り下げることによって形成されている。透過性基板100上における主パターン101の両側には、露光光を回折させ且つ露光により転写されない一対の補助パターン102が、主パターン101との間に透光部を挟むように設けられている。補助パターン102は

、露光光を部分的に透過させる第2の透過率を有する第2の半遮光部から構成されている。

【0202】

図17(c)に示す露光工程では、斜入射露光光源を用いてレジスト膜502に対して露光を行なう。このとき、低い透過率を有する半遮光部がマスクパターンに用いられているため、レジスト膜502の全体が弱いエネルギーで露光される。しかし、図17(c)に示すように、現像工程でレジストが溶解するに足りる露光エネルギーが照射されるのは、主パターン101以外の領域と対応するレジスト膜502の潜像部分502aのみである。

【0203】

次に、図17(d)に示すように、レジスト膜502に対して現像を行なって潜像部分502aを除去することにより、主パターン101と対応するレジストパターン505を形成する。

【0204】

第5の実施形態によると、本発明のフォトマスク（具体的には第1の実施形態に係るフォトマスク）を用いたパターン形成方法であるため、第1の実施形態と同様の効果が得られる。具体的には、レジストが塗布された基板（ウェハ）に対して本発明のフォトマスクを介して斜入射露光を行なう。このとき、位相シフター（開口部）を有するマスクエンハンサー（主パターン101）は非常に強い遮光性を有するので、マスクエンハンサー以外の他の領域と対応するレジストのみに対して、現像工程で溶解するのに十分な露光エネルギーが照射される。また、マスクエンハンサーによって形成される遮光像のコントラストは非常に高いと共に該遮光像のデフォーカス特性は優れているため、DOFの高い微細パターン形成が可能となる。

【0205】

尚、第5の実施形態において、第1の実施形態に係るフォトマスクを用いたが、これに代えて、第2～第4の実施形態のいずれかに係るフォトマスクを用いた場合にも、各実施形態と同様の効果が得られる。

【0206】

また、第5の実施形態において、ポジ型レジストプロセスを用いたが、これに代えて、ネガ型レジストプロセスを用いても、同様の効果が得られる。

【0207】

また、第5の実施形態において、図17(c)に示す露光光503を照射する工程では斜入射照明法（斜入射露光法）を用いることが好ましい。このようにすると、本発明のフォトマスクを透過した光の光強度分布において、主パターン及び透光部のそれぞれと対応する部分の間でのコントラストが向上する。また、光強度分布のフォーカス特性も向上する。従って、パターン形成における露光マージン及びフォーカスマージンが向上する。言い換えると、デフォーカス特性に優れた微細パターン形成が可能となる。

【0208】

次に、補助パターン（回折光発生パターン）を持つ本発明のフォトマスクを用いた斜入射露光において重要な役割を果たす斜入射角の算出方法について説明する。

【0209】

斜入射露光光源として点光源を用いる場合、斜入射角は明確に定義される（図2参照）。しかしながら、面積を有する通常の光源による照明の場合、複数の斜入射角が存在することになる。

【0210】

図18(a)～(e)は、面積を有する光源による照明の場合にも回折光発生パターンの適切な配置位置を算出できるように本願発明者が定義した、斜入射角の主要な算出方法を示す図である。

【0211】

図18(a)は、輪帯照明を行なう場合における斜入射角の算出方法を示している。図18(a)に示すように、輪帯照明においては、輪帯光源の内径S1が最小斜入射角 $\phi 1$ の光源に対応し、輪帯光源の外径S2が最大斜入射角 $\phi 2$ の光源に対応する。従って、回折光発生パターンの配置位置の算出に用いられる斜入射角 ϕ は、内径S1及び外径S2により算出される $S = (S1 + S2) / 2$ の位置から光を照射する光源に基づき定義される。すなわち、斜入射角 $\phi = (\phi 1 +$

$\phi/2$ である。また、 S_1 及び S_2 が NA により規格化された値であれば、斜入射角 ϕ は $\sin \phi = S \times NA = (S_1 + S_2) \times NA / 2$ で定義される。

【0212】

尚、斜入射角 ϕ を、 ϕ_1 以上で且つ ϕ_2 以下の任意の値に設定してもよいことは言うまでもない。言い換えると、斜入射角 ϕ を、 $S_1 \times NA \leq \sin \phi \leq S_2 \times NA$ の関係を満たす任意の値に設定してもよいことは言うまでもない。

【0213】

ところで、第1の実施形態で説明したように、斜入射露光においては、斜入射角 ϕ が $\sin \phi < NA/3$ となる場合、デフォーカス特性の向上効果が得られない。よって、面積を有する光源による照明の場合にも、斜入射角 ϕ が、十分なデフォーカス向上効果の得られる値のみから構成されていることが望ましい。また、露光に使用する光源が $\sin \phi < NA/3$ となる斜入射角 ϕ を含有している場合には、その部分からの斜入射光を無視して最適な回折光発生パターンを設けたマスクを用いて露光を行なった方が、前述の部分からの斜入射光を考慮して回折光発生パターンを設けた場合よりも、パターン形成において優れたデフォーカス特性が発揮される。従って、斜入射角 ϕ の最小角 ξ は $\sin \xi = 0.4 \times NA$ で定義される値であることが好ましい。すなわち、回折光発生パターンの配置位置の算出に用いられる斜入射角 ϕ は $(\xi + \phi_2) / 2$ である。言い換えると、斜入射角 ϕ は $\sin \phi = (0.4 + S_2) \times NA / 2$ で定義される。

【0214】

図18(b)～(e)はそれぞれ、4眼照明を行なう場合における斜入射角の算出方法を示している。4眼照明の場合、各図に示すように、4眼光源(4重極光源)の中心(以下、光源中心と称する)を原点とする XY 座標系を用いて斜入射角を算出する。具体的には、4眼照明の場合、この XY 座標系における X 軸及び Y 軸のそれぞれと平行な各パターンに対して斜入射角を最適化する。すなわち、斜入射角は光源中心から各光源までの距離によって定義されるのではなく、 X 軸上又は Y 軸上における各光源の座標値によって定義される。以下、 Y 軸と平行なパターンに対して斜入射角を最適化する場合について説明するが、 X 軸と平行なパターンに対して斜入射角を最適化する場合も同じことである。まず、最小斜入

射角は、4眼光源の各光源におけるX座標の絶対値のうち最も原点に近い値によって定義される。すなわち、図18(b)～(e)のそれぞれに示す x_1 によって最小斜入射角が定義される。同様に、4眼光源の各光源におけるX座標の絶対値のうち最も原点から遠い値、つまり図18(b)～(e)のそれぞれに示す x_2 によって最大斜入射角が定義される。従って、4眼照明の場合、回折光発生パターンの配置位置の算出に用いられる斜入射角 ϕ は、 $S = (x_1 + x_2) / 2$ の位置から光を照射する光源に基づき定義される。すなわち、斜入射角 ϕ は $\sin \phi = S \times NA = (x_1 + x_2) \times NA / 2$ で定義される。

【0215】

尚、斜入射角 ϕ を、 $x_1 \times NA \leq \sin \phi \leq x_2 \times NA$ の関係を満たす任意の値に設定してもよいことは言うまでもない。

【0216】

また、図18(b)～(e)に示す4眼照明の場合も、図18(a)に示す輪帯照明の場合と同様に、斜入射角 ϕ の最小角 ξ は $\sin \xi = 0.4 \times NA$ で定義される値であることが好ましい。すなわち、回折光発生パターンの配置位置の算出に用いられる斜入射角 ϕ は $\sin \phi = (0.4 + x_2) \times NA / 2$ で定義される。

【0217】

(第6の実施形態)

以下、本発明の第6の実施形態に係るマスクデータ作成方法、具体的には、中心線強調法、輪郭強調法及び回折光発生パターンを用いた、第1～第4の実施形態のいずれかに係るフォトマスク（以下、本発明のフォトマスク）のマスクデータ作成方法について図面を参照しながら説明する。尚、本実施形態において、フォトマスクの各構成要素の機能及び性質等は、特に断らない限り、既述の本発明のフォトマスクにおける対応する構成要素と同じである。

【0218】

図19は、第6の実施形態に係るマスクデータ作成方法、具体的には、微細な所望のパターンに基づき、マスク上で遮光パターンとなるLSI用マスクパターンを作成する方法のフロー図である。また、図20(a)～(g)は、第6の実

施形態に係るマスクデータ作成方法の各工程における具体的なマスクパターン作成例を示す図である。

【 0 2 1 9 】

図 2 0 (a) は、マスクパターンによって形成しようとする所望のパターンを示している。すなわち、図 2 0 (a) に示すパターン 6 0 0 が、本発明のフォトマスクを用いた露光においてレジストを感光させたくない領域に相当するパターンである。尚、本実施形態でパターン形成について説明する場合、特に断らない限り、ポジ型レジストプロセスの使用を前提として説明を行なう。すなわち、現像により、レジストの感光部が除去され且つレジストの非感光部がレジストパターンとして残存することを想定して説明を行なう。従って、ネガ型レジストプロセスの使用の場合には、レジストの感光部がレジストパターンとして残存し且つレジストの非感光部が除去されると考える他は全く同様である。

【 0 2 2 0 】

まず、ステップ S 1 において、図 2 0 (a) に示す所望のパターン 6 0 0 を、マスクデータ作成に用いるコンピュータに入力する。

【 0 2 2 1 】

次に、ステップ S 2 において、露光条件をオーバー露光にするか又はアンダー露光にするかに応じて、図 2 0 (a) に示す所望のパターンを拡大し又は縮小するリサイズを行なう。そして、リサイズ後のパターンを、図 2 0 (b) に示すように、半遮光部から構成される主パターン 6 0 1 とする。

【 0 2 2 2 】

次に、ステップ S 3 において、図 2 0 (c) に示すように、主パターン 6 0 1 における寸法が所定値以下の領域の中心部に配置される位相シフター 6 0 2 の形状（幅等。以下同じ）を決定する。このとき、位相シフター 6 0 2 が主パターン 6 0 1 つまり半遮光パターンの内部に完全に含有されるようにする。すなわち、主パターン 6 0 1 の最外エッジが半遮光パターンのエッジとなるようにする。

【 0 2 2 3 】

次に、ステップ S 4 において、図 2 0 (d) に示すように、主パターン 6 0 1 における寸法が所定値よりも大きい領域の周縁部に配置される位相シフター 6 0

2の形状を決定する。このとき、位相シフター602が主パターン601つまり半遮光パターンの内部に完全に含有されるようにし、それにより主パターン601の最外エッジが半遮光パターンのエッジとなるようにする。

【0224】

次に、ステップS5において、図20(e)に示すように、ステップS3及びステップS4で配置した位相シフター602からそれぞれ所定の距離（露光時に使用される光源による照明の斜入射角等に基づき定められる距離）離れた位置に、露光光を回折させる補助パターンとして、半遮光部から構成される第1次回折光発生パターン603及び第2次回折光発生パターン604を配置する。例えば位相シフター602がライン状のパターンである場合、ライン状の回折光発生パターンが位相シフター602から所定の距離離れた位置に位相シフター602と平行になるように配置される。但し、回折光発生パターンの配置位置に他のパターンが存在する場合、該他のパターンが存在する領域には回折光発生パターンを配置しない。

【0225】

次に、ステップS6において、本発明のフォトマスクを用いて露光を行なったときにマスクパターンに対応して所望の寸法を持つパターンが形成されるようにマスクパターンの寸法調整を行なう処理の準備を行なう。すなわち、通常OPC (Optical Proximity Correction) 処理と呼ばれる処理の準備を行なう。本実施形態では、パターン形成時の寸法つまりCD (Critical Dimension) を予測して該結果に基づき寸法調整されるマスクパターン領域を、主パターン601のエッジつまり半遮光パターンのエッジのみに限定する。すなわち、図20(f)に示すように、主パターン601の最外エッジをCD調整用エッジ605に設定する。これにより、位相シフター602並びにそれに対して最適な位置に配置された回折光発生パターン603及び604を変形することなく、所望のCDを実現できるマスクパターンの作成が可能となる。

【0226】

次に、ステップS7において、マスクパターンに用いる半遮光部及び位相シフターのそれぞれの透過率を設定する。

【0227】

次に、ステップS8、ステップS9及びステップS10において、OPC処理（例えばモデルベースOPC処理）を行なう。具体的には、ステップS8において、光学原理及びレジスト現像特性を考慮したシミュレーションによって、位相シフター602が配置された主パターン601と回折光発生パターン603及び604とにより形成されるレジストパターンの寸法を予測する。続いて、ステップS9において、予測されたレジストパターンの寸法が所望の寸法と一致しているかどうかを調べる。所望の寸法と一致しない場合、ステップS10において、レジストパターンの予測寸法と所望の寸法との差に基づきCD調整用エッジ605を移動させ、それによって主パターン602の変形を行なう。

【0228】

本実施形態の特徴は、ステップS6で設定されたCD調整用エッジ605のみを変化させることにより、所望の寸法を持つレジストパターンを形成できるマスクパターンを実現することである。すなわち、ステップS8～S10を、レジストパターンの予測寸法と所望の寸法とが一致するまで繰り返すことにより、最終的に、ステップS11において、所望の寸法を持つレジストパターンを形成できるマスクパターンを出力する。図20（g）は、ステップS11で出力されたマスクパターンの一例を示している。

【0229】

ところで、本来、本発明のフォトマスクにおけるパターン（レジストパターン）寸法に影響を及ぼすパラメータは、位相シフターの幅、マスクパターン（主パターン）の幅、並びに補助パターンの幅及び位置等と非常に多い。

【0230】

それに対して、第6の実施形態によると、重要なパターン形成特性であるコントラスト及びデフォーカス特性等が優れたマスクを実現するために、まず、重要なパラメータである位相シフター602の幅並びに回折光発生パターン603及び604の配置位置を決定する。その後、CD調整用エッジ605として設定された、主パターン602の最外エッジのみを移動させてパターン寸法制御を行なうことにより、優れたパターン形成特性を持つマスクパターンを実現する。

【 0 2 3 1 】

従って、本実施形態の方法により作成されたマスクデータに基づきフォトマスク作成を行ない、さらに、そのフォトマスクを用いて斜入射露光を行なうことによって、微細パターンの形成においても又は微細スペースの形成においても、高いコントラストと、非常に優れたDOF特性とが得られる。

【 0 2 3 2 】

また、第6の実施形態によると、位相シフター602が、主パターン601における寸法が所定値以下の領域の中心部に配置されるため、より微細な所望のパターンを形成でき且つ優れたパターン形成特性を持つマスクパターンを実現できる。

【 0 2 3 3 】

また、第6の実施形態によると、位相シフター602が主パターン601の周縁部に配置されるため、任意の形状を持つ所望のパターンを形成でき且つ優れたパターン形成特性を持つマスクパターンを実現できる。

【 0 2 3 4 】

尚、第6の実施形態において、半遮光部を用いたマスクエンハンサー構造を持つマスクパターンを対象として説明を行なったが、これに代えて、遮光部を用いたマスクエンハンサー構造を持つマスクパターンを対象としてもよい。具体的には、本実施形態で半遮光部として説明をしている箇所を全て遮光部に置き換えてもよい。また、この場合、ステップS4の、主パターン601の周縁部に位相シフター602を配置する工程を省略してもよい。尚、半遮光部に代えて遮光部を用いた場合、本実施形態の方法に従って作成されたマスクパターンによって、コントラスト又はDOFの向上が生じるのは、所定の寸法以下のパターンを形成する場合に限定される。具体的には、微小スペースの形成においては、コントラスト又はDOFの向上効果は生じない。しかしながら、例えば、高速動作を目的としたLSI回路のゲート層のパターン形成、つまり、トランジスタパターンの寸法のみが極めて微細であり且つ微小なスペースパターンを含まないパターンの形成等においては、前述の効果が十分に生じる。

【 0 2 3 5 】

また、第 1 ～ 第 6 の実施形態において、透過型のフォトマスクを想定して説明してきた。しかし、本発明はこれに限定されるものではなく、例えば透過率を反射率と読み替える等して、露光光の透過現象を全て反射現象に置き換えて考えれば、反射型マスクについても本発明は成り立つものである。

【 0 2 3 6 】

【発明の効果】

本発明によると、フォトマスク上に設けられた主パターンの位相シフターを透過した光によって、透光部を透過した光の一部を打ち消すことができる。このため、主パターンと対応する遮光像における光強度分布のコントラストを強調できる。また、主パターンとは別に、露光光を回折させる補助パターンがフォトマスク上に設けられているため、主パターンの位相シフターを透過した光と干渉する回折光を発生させることができる。従って、主パターンの転写像におけるデフォーカス特性が向上し、その結果、DOF特性が向上する。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

(a) は本発明の第 1 の実施形態に係るフォトマスクの平面図であり、(b) は (a) の I - I 線における断面図である。

【図 2】

(a) はパターンが周期的に配置されたマスクに対して露光を行なった場合に生じる回折現象を説明する図であり、(b) は (a) に示すマスクに対して 0 次回折光及び 1 次回折光のみがレンズを通過し且つ $r_0 = -r_1$ となる条件下で斜入射露光を行なった場合に生じる回折現象を説明する図であり、(c) は (a) に示すマスクに対して、0 次回折光、+ 1 次回折光及び - 1 次回折光がレンズを通過する条件下で斜入射露光を行なった場合に生じる回折現象を説明する図であり、(d) は (a) に示すマスクに対して、0 次回折光、1 次回折光及び 2 次回折光がレンズを通過する条件下で斜入射露光を行なった場合に生じる回折現象を説明する図である。

【図 3】

(a) は図 2 (a) に示すマスクに対してピッチパターンのピッチを変えなが

ら斜入射露光を行なった場合におけるDOF特性のシミュレーションに用いた点光源を示す図であり、(b)は該シミュレーションに用いたピッチパターンを示す図であり、(c)は該シミュレーションの結果を示す図である。

【図4】

(a)はマスク上のピッチパターンのピッチを変えながら斜入射露光を行なった場合におけるDOF特性のシミュレーションに用いたピッチパターン（実質的に無限周期的に配置されたマスクエンハンサー）を示す図であり、(b)は該シミュレーションの結果を示す図である。

【図5】

(a)はマスク上のピッチパターンのピッチを変えながら斜入射露光を行なった場合におけるDOF特性のシミュレーションに用いたピッチパターン（並列的に配置された3個のマスクエンハンサー）を示す図であり、(b)は該シミュレーションの結果を示す図である。

【図6】

(a)～(c)はそれぞれ、マスクエンハンサーよりなる主パターンのDOF特性が大幅に向上するように回折光発生パターン（補助パターン）が配置されてなる本発明のマスクパターンを示す平面図である。

【図7】

(a)は位相シフターのみが設けられたマスク及び該マスクに対して露光を行なった場合に生じる光強度分布を示す図であり、(b)は半遮光パターンのみが設けられたマスク及び該マスクに対して露光を行なった場合に生じる光強度分布を示す図であり、(c)は(a)及び(b)のそれぞれに示すマスクに対して位相シフター及び半遮光パターンの線幅を変化させながら所定の条件で露光を行なった場合における遮光性の変化をシミュレーションにより計算した結果を示す図である。

【図8】

(a)は図6(a)～(c)に示す位置に回折光発生パターンを配置することによって良好なDOF特性が得られることを実証するためのシミュレーションにおいて用いたパターン（マスクパターン）を示す図であり、(b)は該シミュレ

ーションの結果を示す図である。

【図 9】

(a) は図 6 (a) ~ (c) に示す位置に回折光発生パターンを配置することによって良好な D O F 特性が得られることを実証するためのシミュレーションにおいてレンズ開口数 $NA = 0.6$ 、 $\sin \phi = 0.7 \times NA$ の光学条件を用いた場合の結果を示す図であり、(b) は該シミュレーションにおいてレンズ開口数 $NA = 0.6$ 、 $\sin \phi = 0.6 \times NA$ の光学条件を用いた場合の結果を示す図であり、(c) は該シミュレーションにおいてレンズ開口数 $NA = 0.7$ 、 $\sin \phi = 0.7 \times NA$ の光学条件を用いた場合の結果を示す図である。

【図 1 0】

(a) ~ (c) はそれぞれ、面積を有する光源を用いた場合における本発明の回折光発生パターンによる D O F 特性の向上効果を評価するためのシミュレーションに用いたパターン（マスクパターン）を示す図であり、(d) は該シミュレーションに用いた光源を示す図であり、(e) は (a) ~ (c) のそれぞれに示すマスクパターンに対して所定の条件で露光を行なった場合にマスクエンハンサーに対応して生じる光強度分布のシミュレーション結果を示す図であり、(f) は (a) ~ (c) のそれぞれに示すマスクパターンに対して所定の条件で露光を行なってマスクエンハンサーと対応する幅 $0.1 \mu m$ のパターンを形成した場合における該パターンの C D のデフォーカス特性をシミュレーションした結果を示す図である。

【図 1 1】

(a) は図 1 0 (b) に示すマスクパターンにおいて第 1 次回折光発生パターンが位相シフターを中心から距離 $P 1$ 離れた位置に配置されている様子を示す図であり、(b) は (a) に示すマスクパターンに対して距離 $P 1$ を変化させながら露光を行なった場合における D O F の変化を示す図であり、(c) は図 1 0 (c) に示すマスクパターンにおいて第 2 次回折光発生パターンが第 1 次回折光発生パターンの中心から距離 $P 2$ 離れた位置に配置されている様子を示す図であり、(d) は (c) に示すマスクパターンに対して距離 $P 2$ を変化させながら露光を行なった場合における D O F の変化を示す図である。

【図 1 2】

本発明の第 2 の実施形態に係るフォトマスクの平面図である。

【図 1 3】

(a) は本発明の第 3 の実施形態に係るフォトマスクの平面図であり、(b) は (a) の XIII-XIII 線における断面図である。

【図 1 4】

本発明の第 3 の実施形態の変形例に係るフォトマスクの平面図である。

【図 1 5】

(a) は本発明の第 4 の実施形態に係るフォトマスクの平面図であり、(b) は (a) の XV-XV 線における断面図である。

【図 1 6】

本発明の第 4 の実施形態の変形例に係るフォトマスクの平面図である。

【図 1 7】

(a) ~ (d) は本発明の第 5 の実施形態に係るパターン形成方法の各工程を示す断面図である。

【図 1 8】

(a) ~ (e) はそれぞれ、面積を有する光源による照明の場合にも回折光発生パターンの適切な配置位置を算出できるように本願発明者が定義した、斜入射角の主要な算出方法を示す図である。

【図 1 9】

本発明の第 6 の実施形態に係るマスクデータ作成方法のフロー図である。

【図 2 0】

(a) ~ (g) は本発明の第 6 の実施形態に係るマスクデータ作成方法の各工程における具体的なマスクパターン作成例を示す図である。

【図 2 1】

従来のフォトマスクの平面図である。

【図 2 2】

従来のフォトマスクの平面図である。

【符号の説明】

1 0 0	透過性基板
1 0 1	主パターン
1 0 1 A	第 1 の半遮光部
1 0 1 B	位相シフター
1 0 2	補助パターン
1 1 0	マスクエンハンサー
1 1 1	半遮光部
1 1 2	位相シフター
1 1 3	第 1 次回折光発生パターン
1 1 4	第 2 次回折光発生パターン
1 4 0	光源
1 4 1	光
1 4 2	0 次回折光
1 4 3	1 次回折光
1 4 4	- 1 次回折光
1 4 5	2 次回折光
1 5 0	マスク
1 5 1	ピッチパターン
1 5 2	レンズ
1 6 0	透過性基板
1 6 1	位相シフター
1 7 0	透過性基板
1 7 1	半遮光パターン
2 0 0	透過性基板
2 0 1	主パターン
2 0 1 A	第 1 の半遮光部
2 0 1 B	位相シフター
2 0 2	第 1 の補助パターン
2 0 3	第 2 の補助パターン

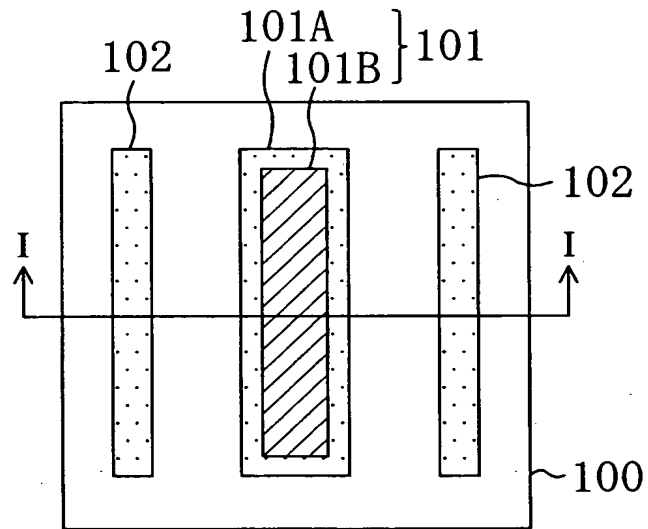
3 0 0	透過性基板
3 0 1	主パターン
3 0 1 A	第 1 の遮光部
3 0 1 B	位相シフター
3 0 2	第 1 の補助パターン
3 0 3	第 2 の補助パターン
4 0 0	透過性基板
4 0 1	主パターン
4 0 2	第 1 の補助パターン
4 0 3	第 2 の補助パターン
5 0 0	基板
5 0 1	被加工膜
5 0 2	レジスト膜
5 0 2 a	潜像部分
5 0 3	露光光
5 0 4	透過光
5 0 5	レジストパターン
6 0 0	所望のパターン
6 0 1	主パターン
6 0 2	位相シフター
6 0 3	第 1 次回折光発生パターン
6 0 4	第 2 次回折光発生パターン
6 0 5	C D 調整用エッジ
S	レンズ中心を通る法線から光源までの距離
ϕ	斜入射角
NA	レンズ開口数
P	ピッチ
$\theta 1$	1 次回折光の回折角
$\theta 2$	2 次回折光の回折角

λ	光の波長
r_0	レンズ上における 0 次回折光の到達位置
r_1	レンズ上における 1 次回折光の到達位置
L	パターン幅（線幅）
W	開口幅
R	パターン間距離
D	回折光発生パターン幅
I_a	位相シフターの中心と対応する光強度
I_b	半遮光パターンの中心と対応する光強度
X	位相シフターから 1 次回折光発生パターンまでの距離
Y	1 次回折光発生パターンから 2 次回折光発生パターンまでの距離
P_1	位相シフターから 1 次回折光発生パターンまでの距離
P_2	1 次回折光発生パターンから 2 次回折光発生パターンまでの距離
S_1	輪帯光源の内径
S_2	輪帯光源の外径
x_1	4 眼光源の各光源における X 座標のうち最も原点に近い値
x_2	4 眼光源の各光源における X 座標のうち最も原点から遠い値

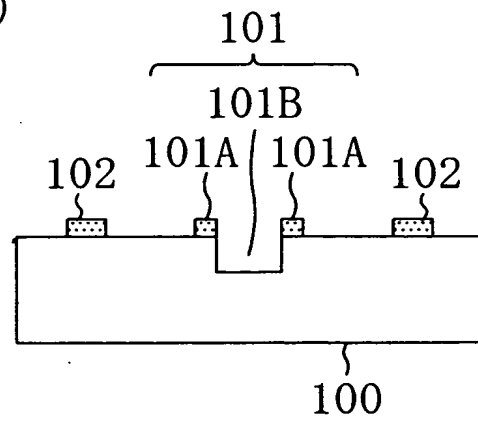
【書類名】 図面

【図 1】

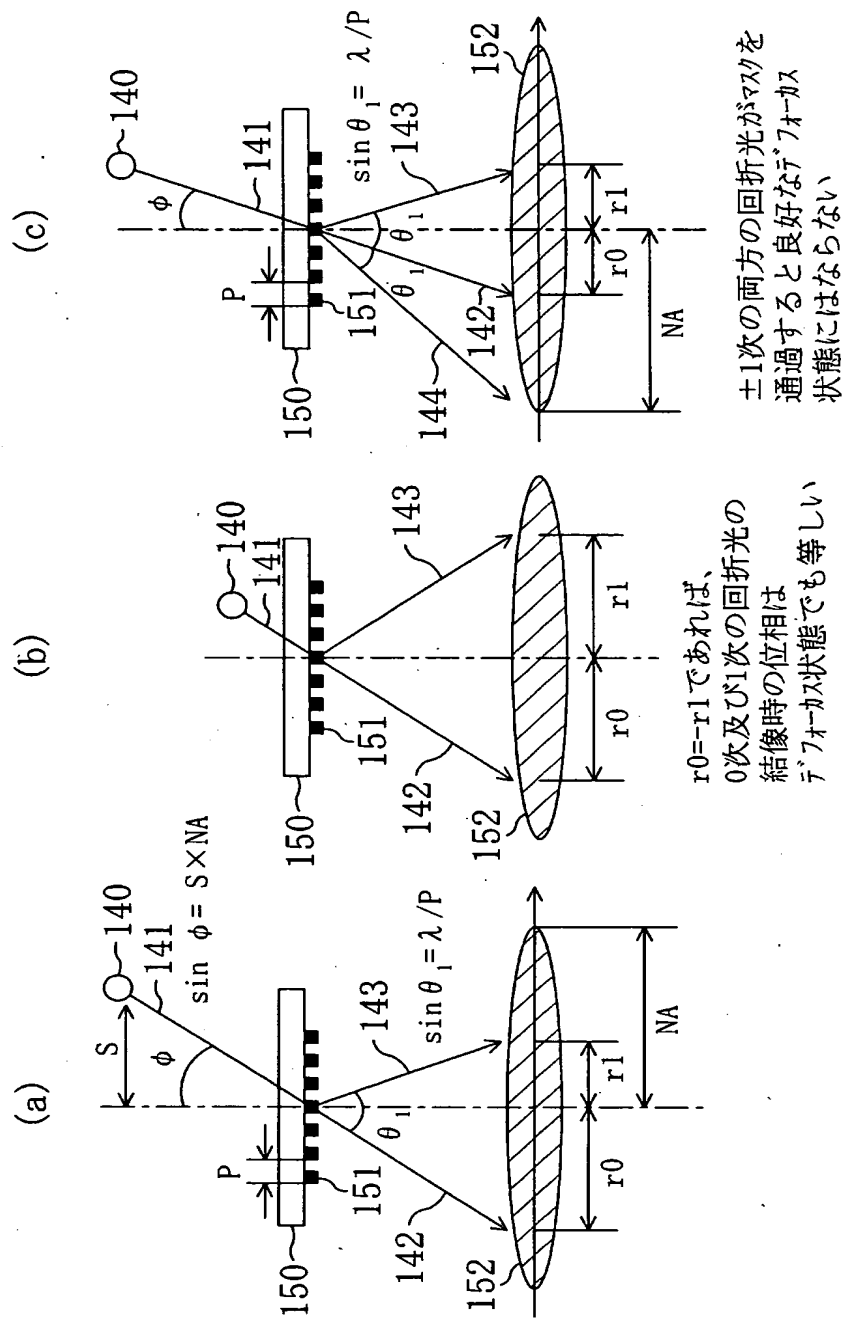
(a)



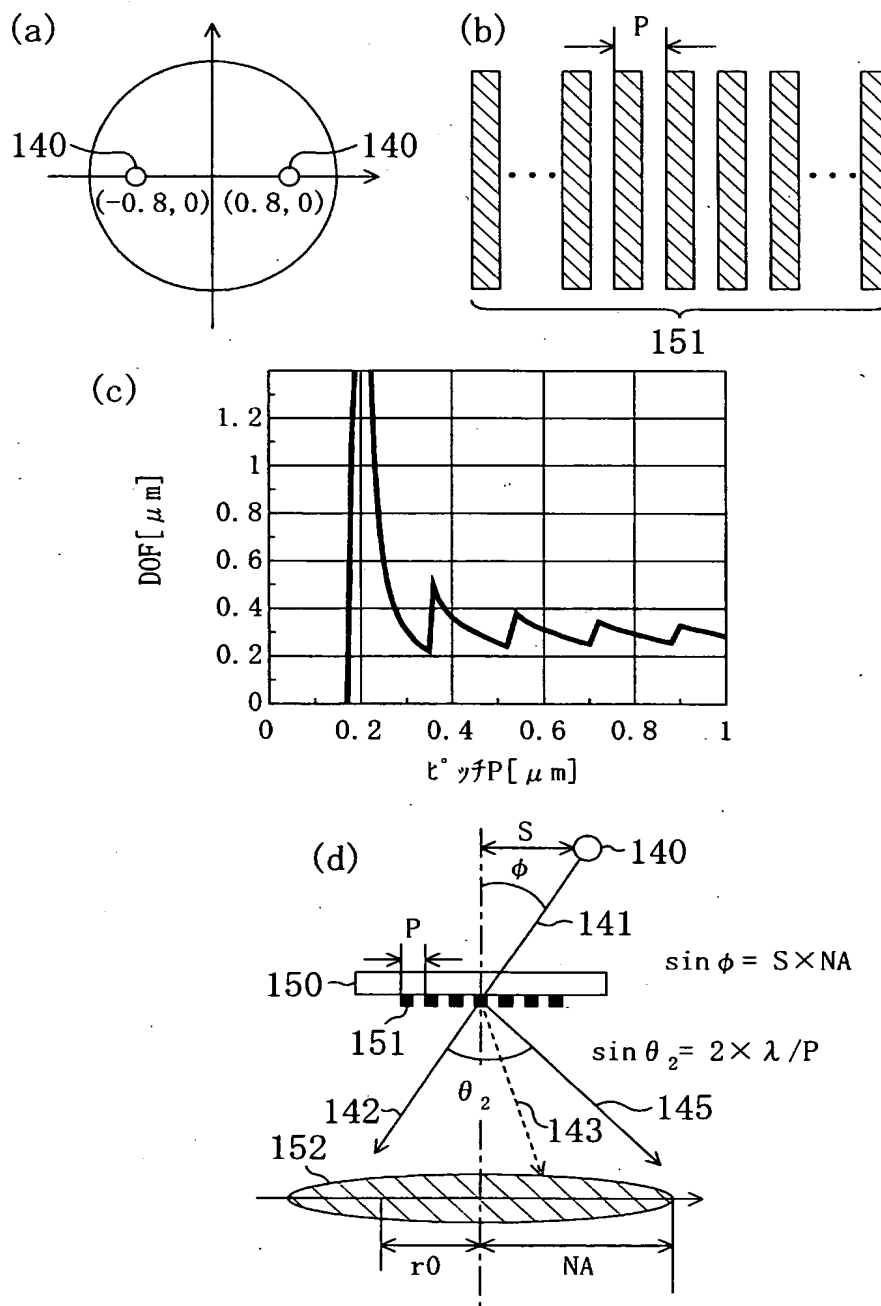
(b)



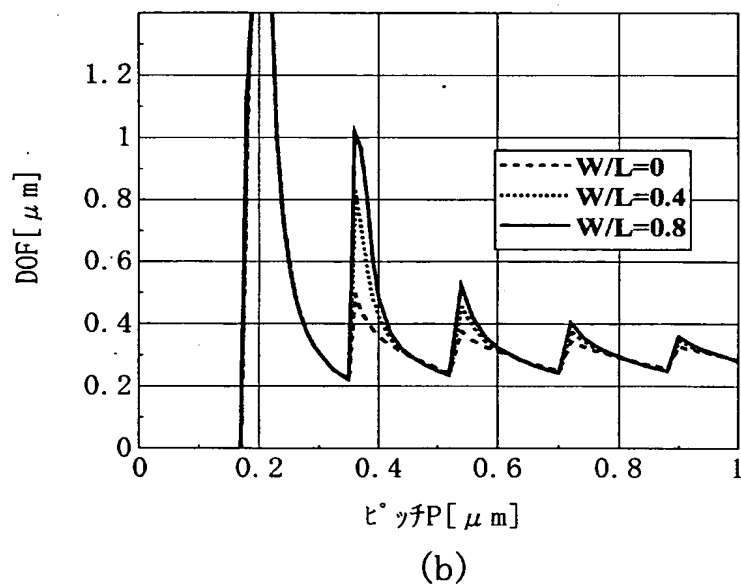
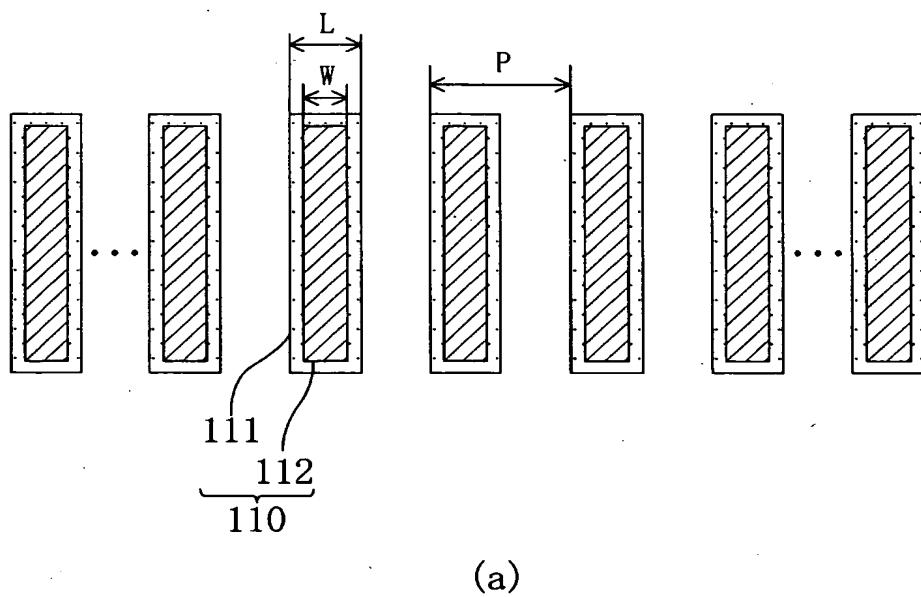
【図2】



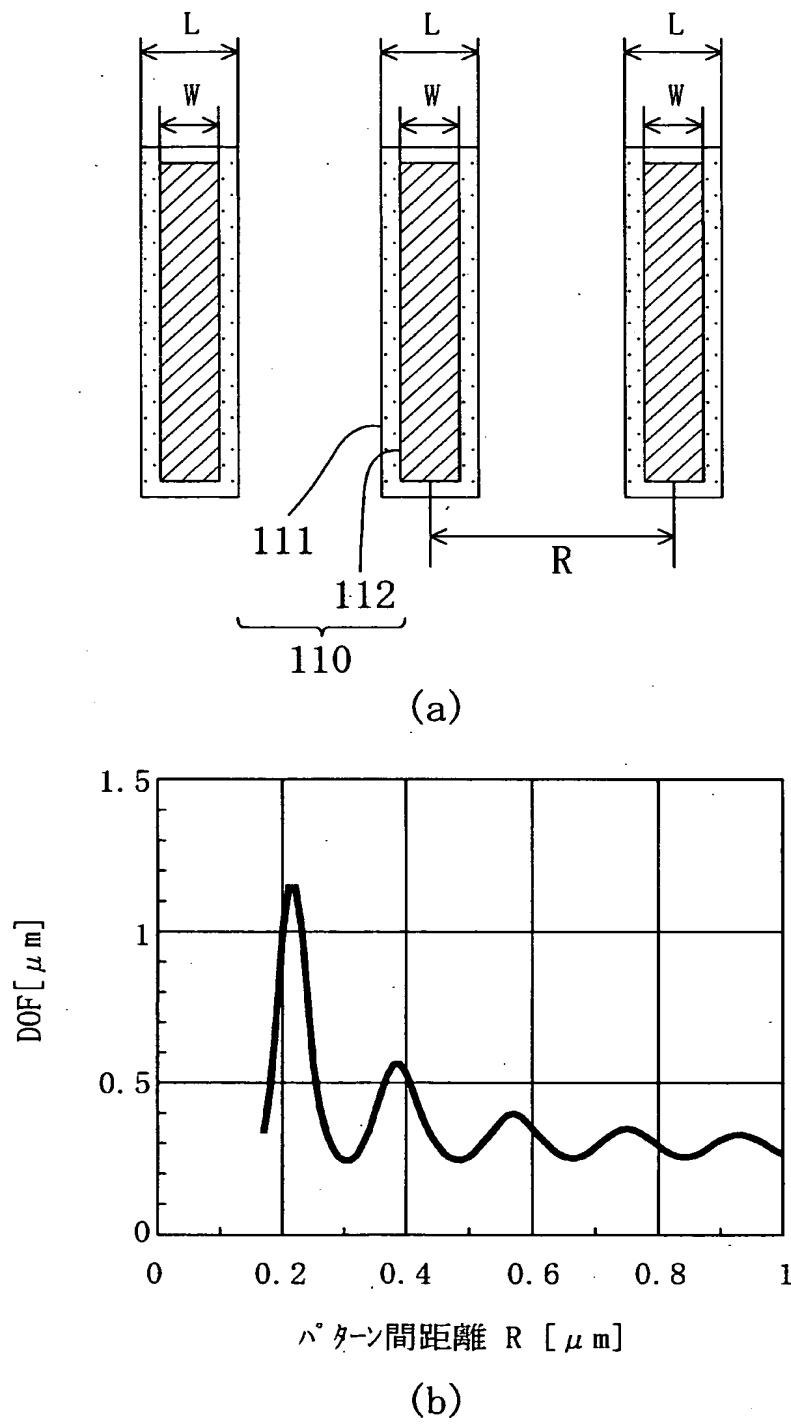
【図 3】



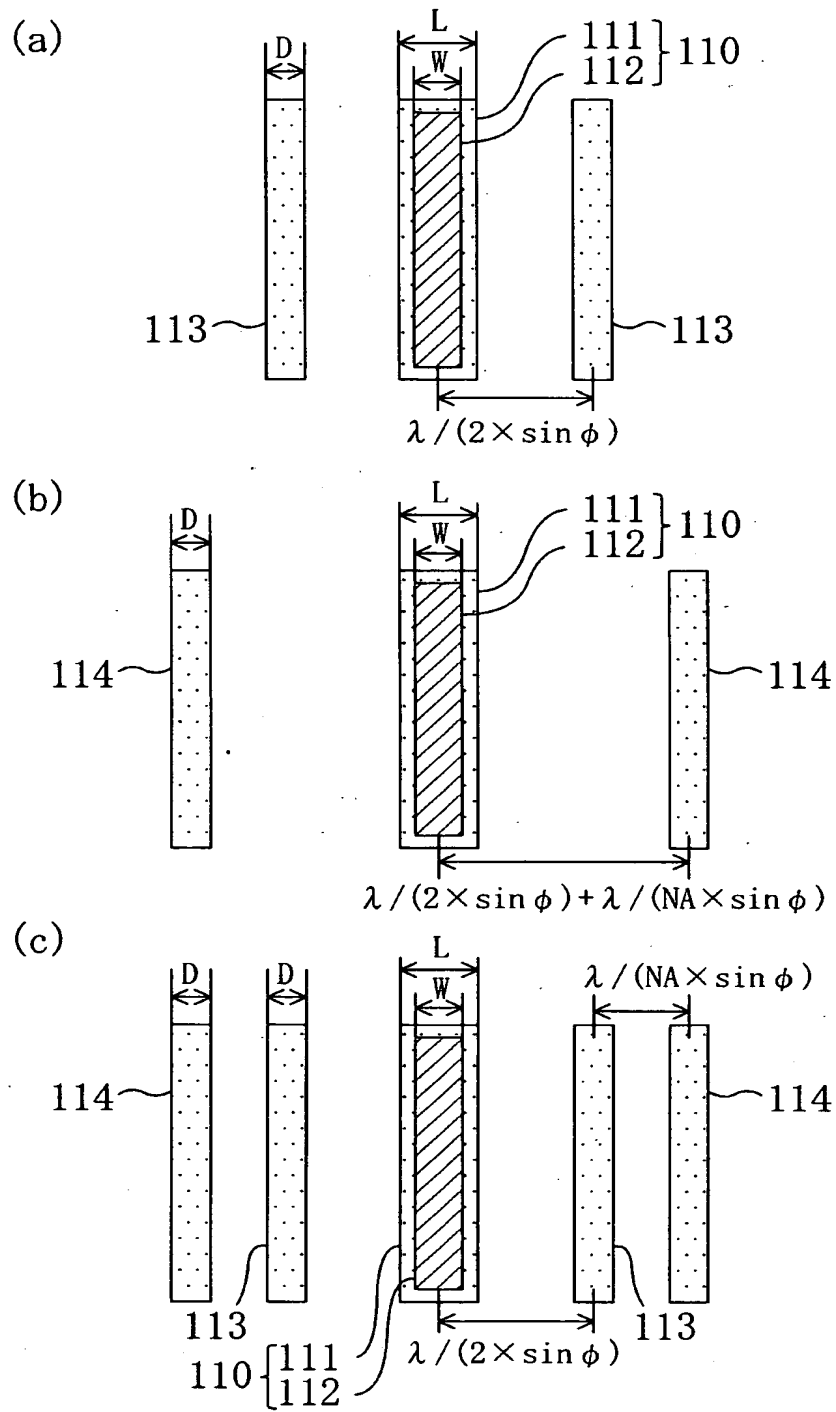
【図 4】



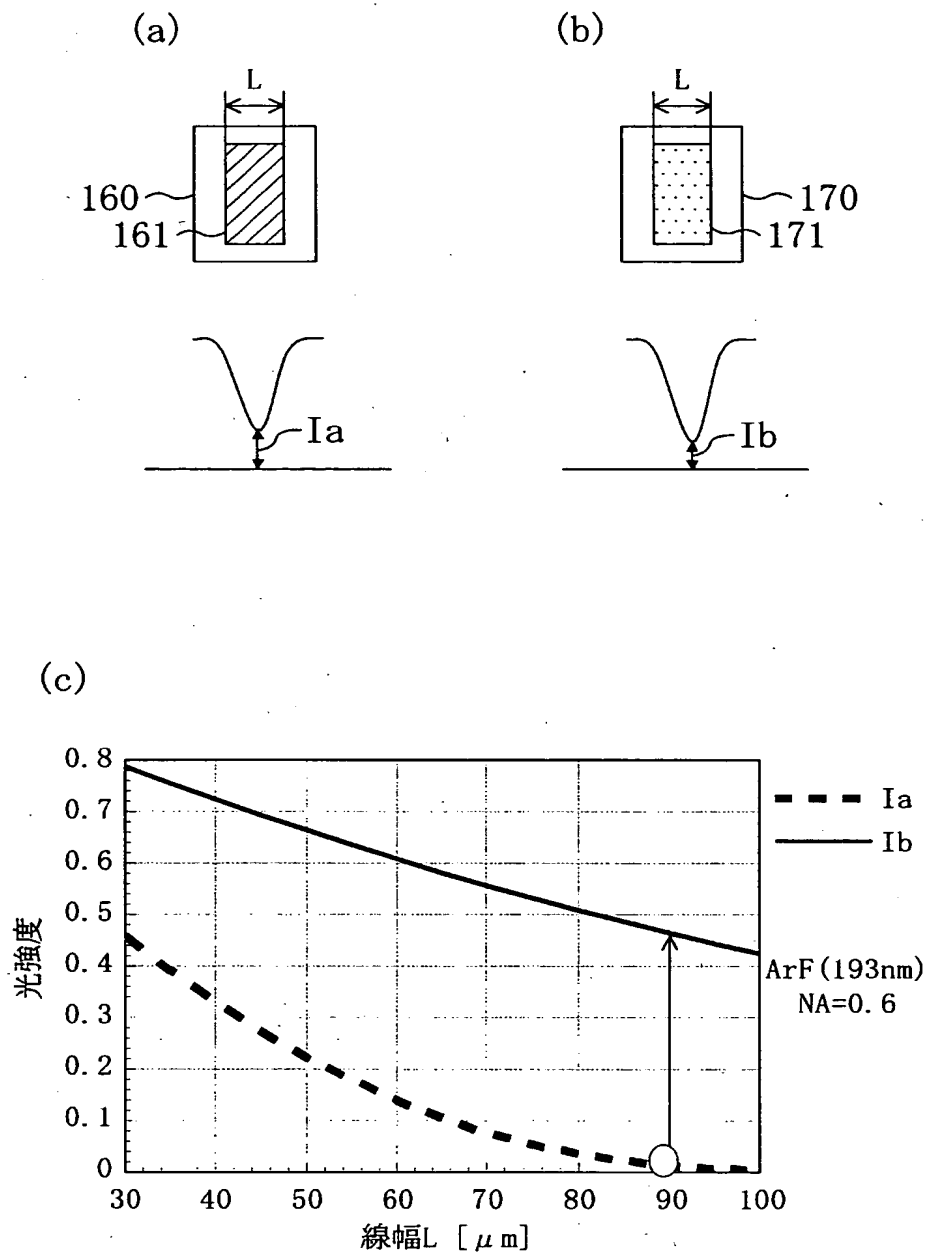
【図 5】



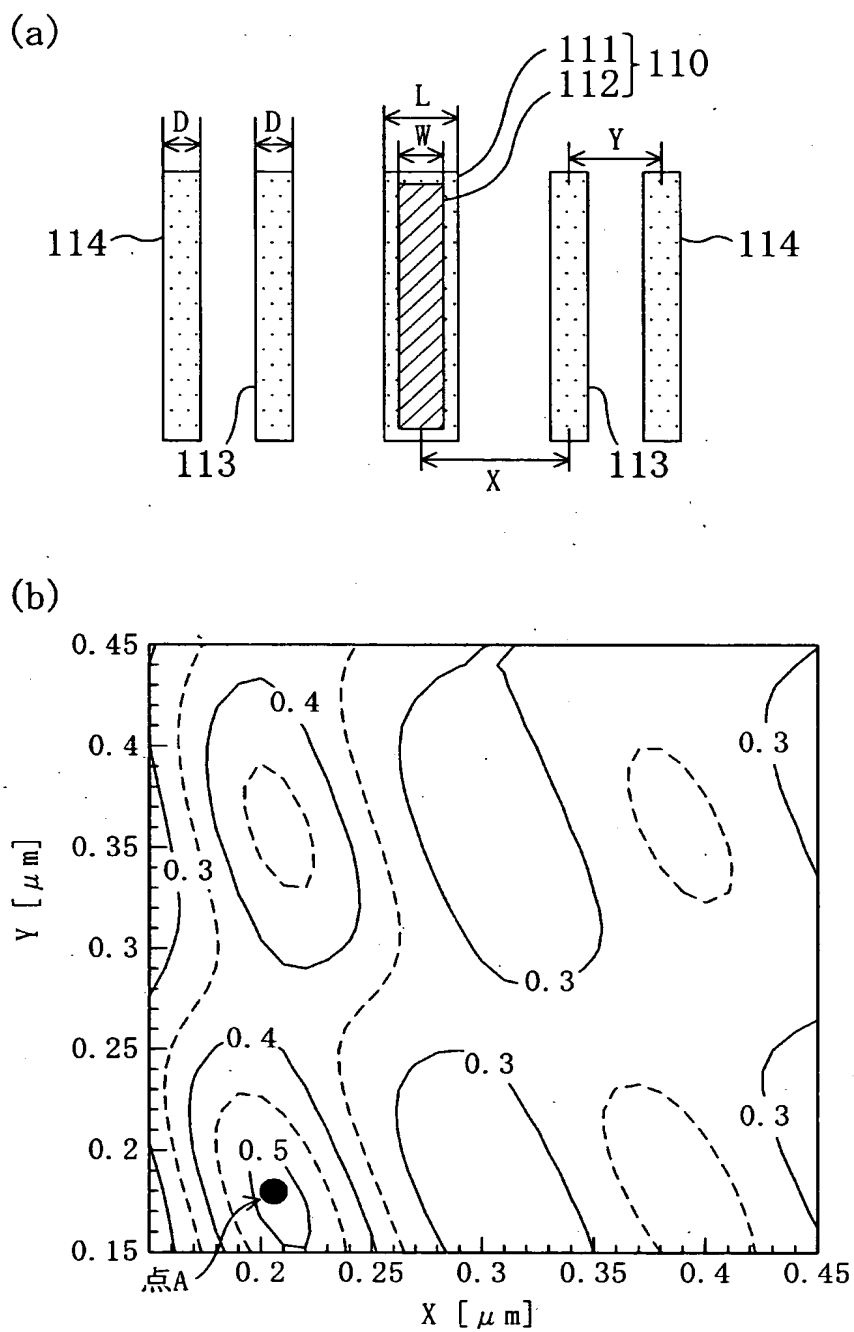
【図6】



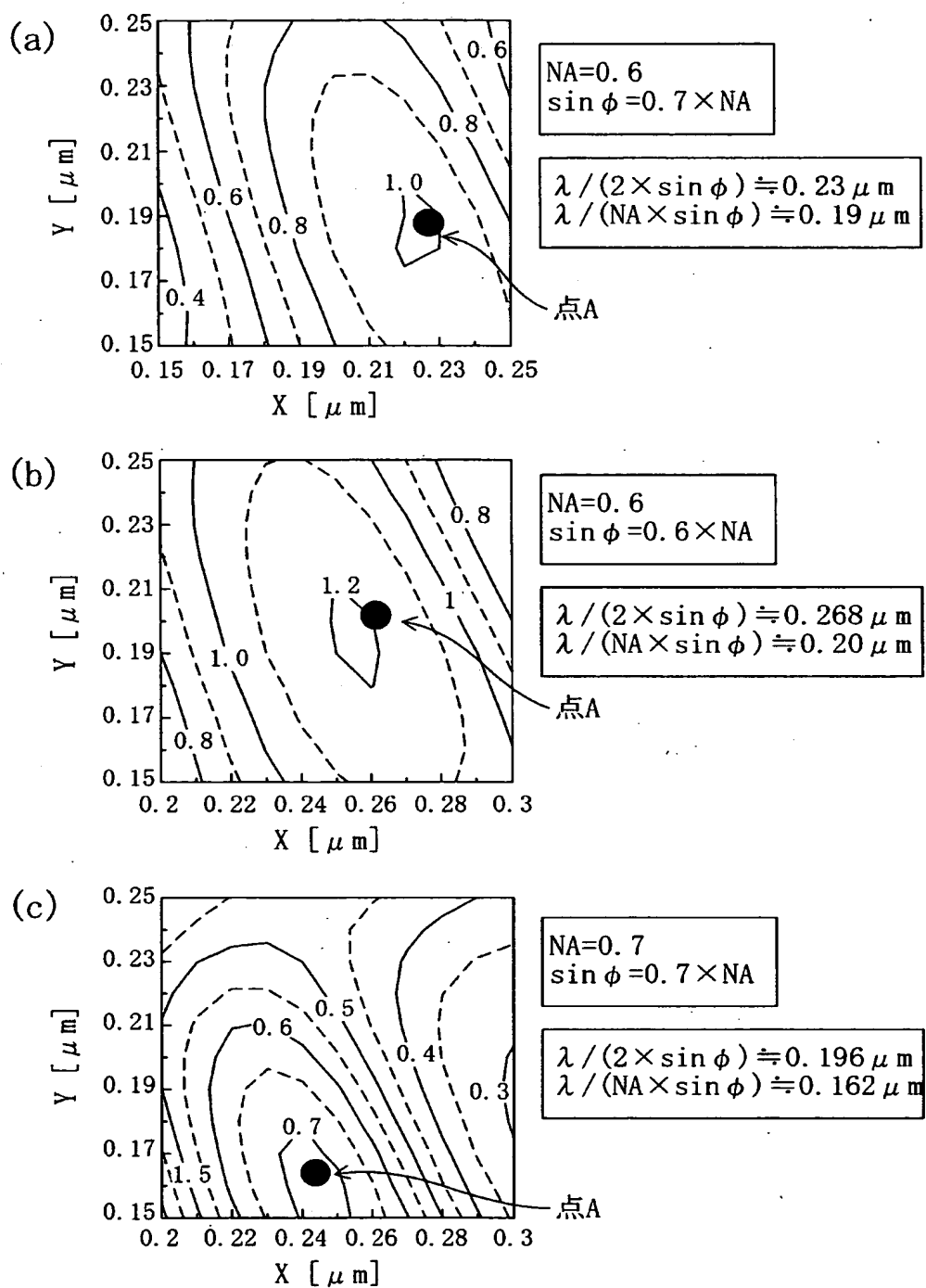
【図 7】



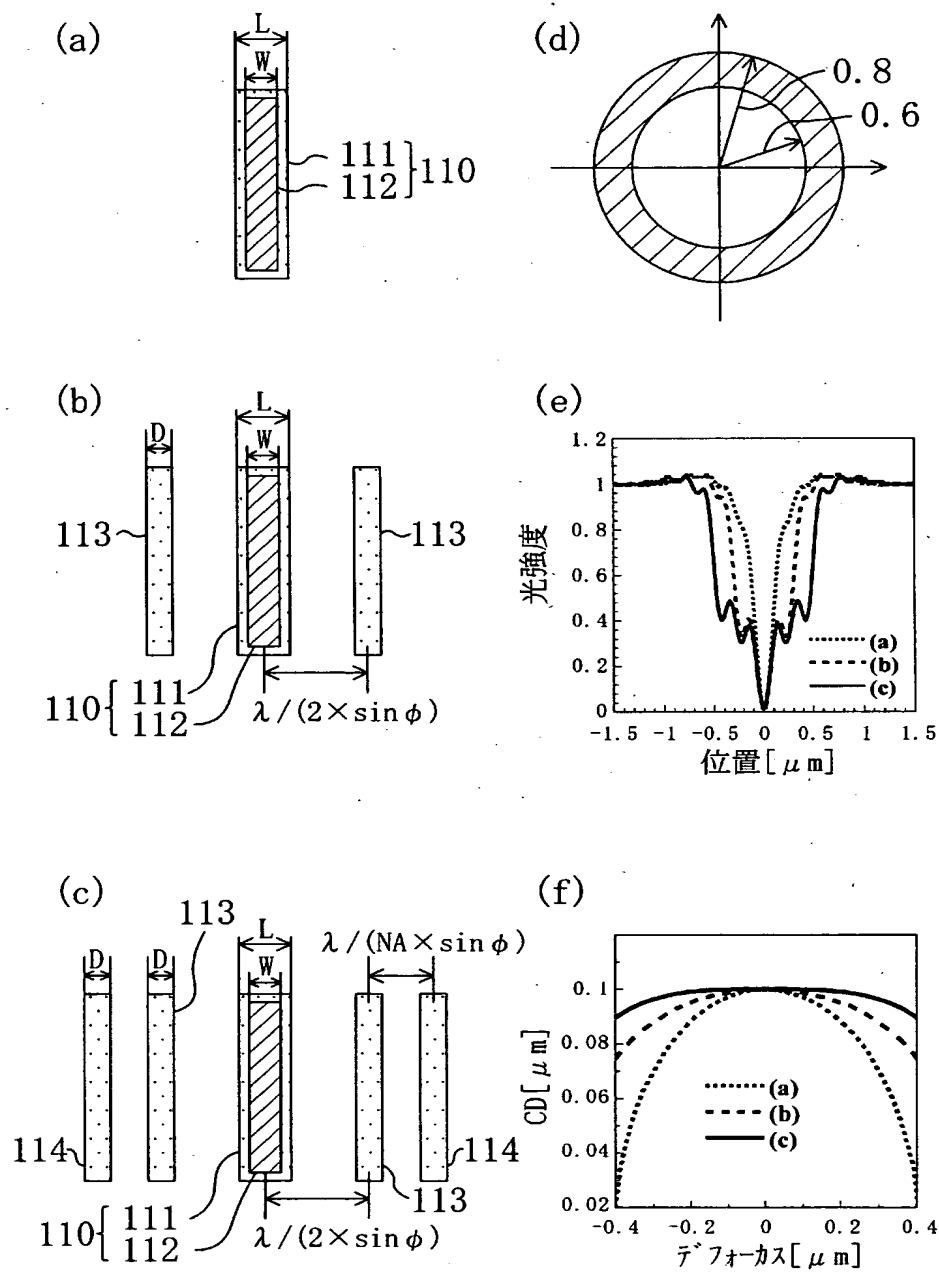
【図8】



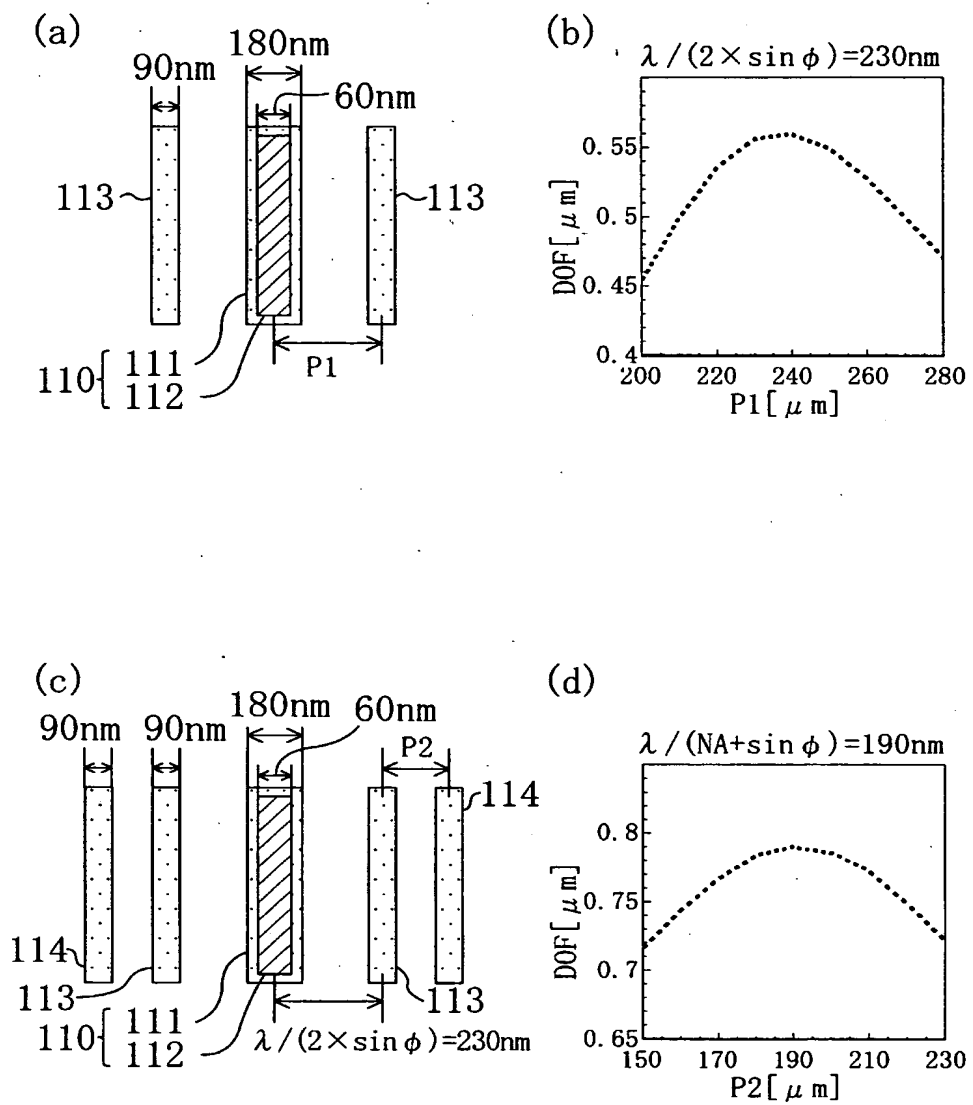
【図9】



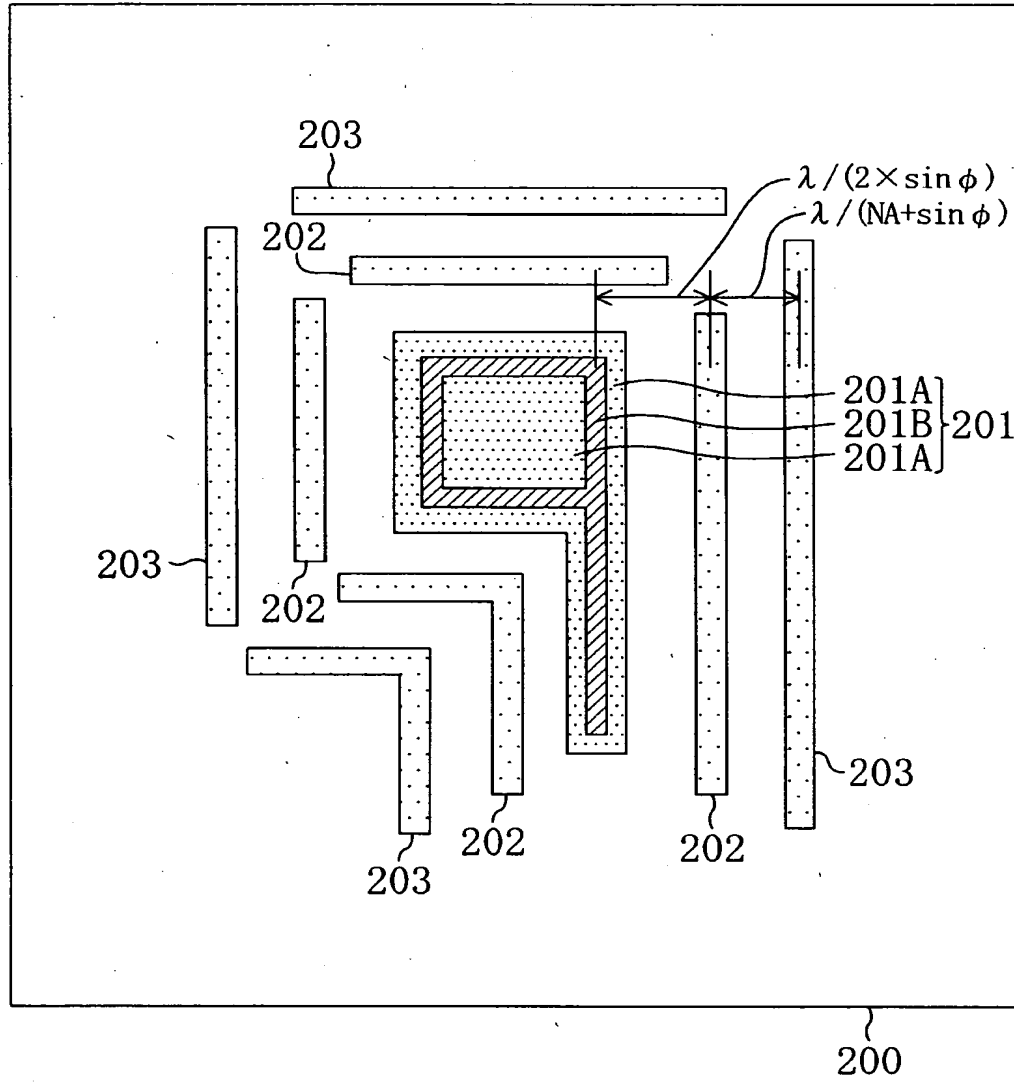
【図10】



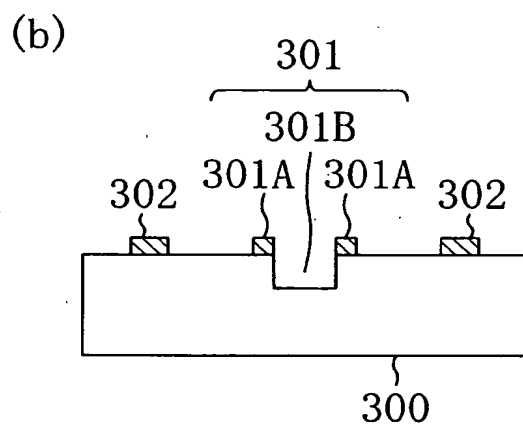
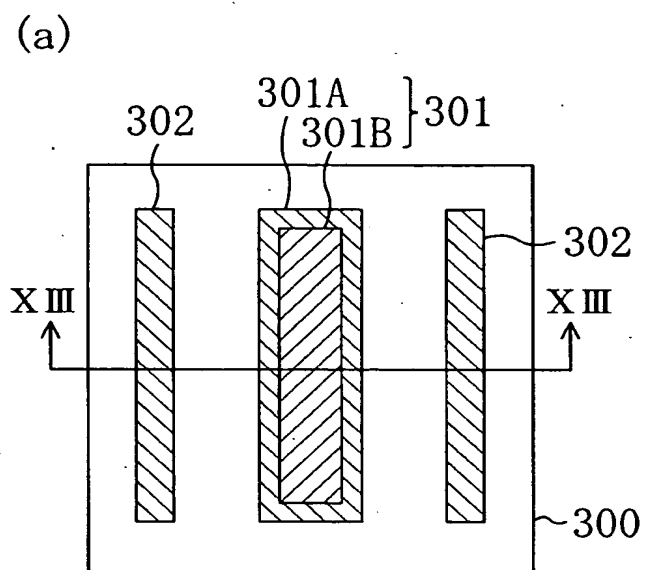
【図 11】



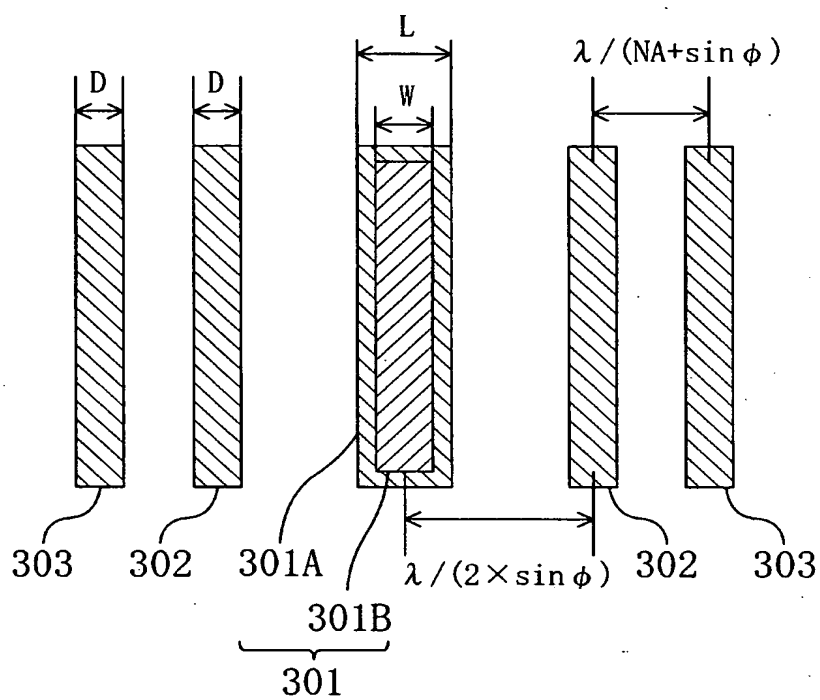
【図 1 2】



【図 1 3】

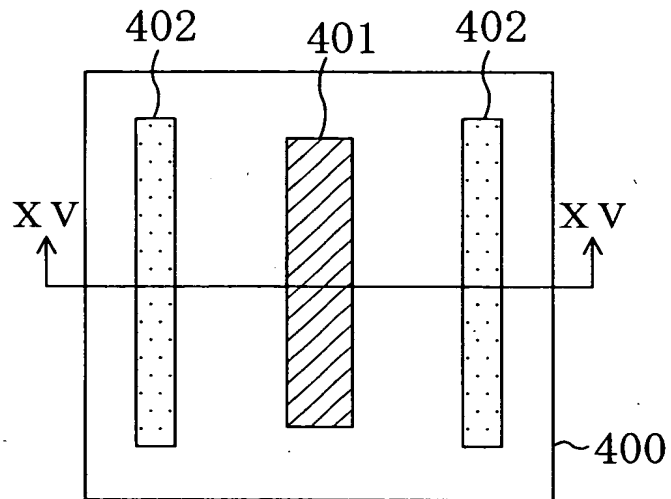


【図 1 4】

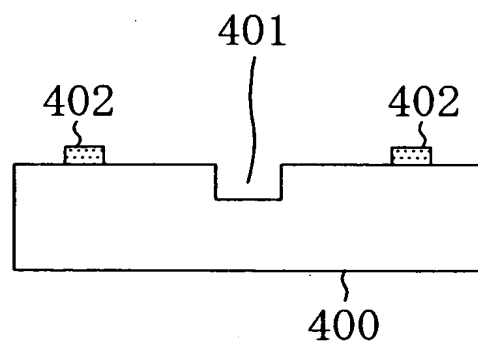


【図 1 5】

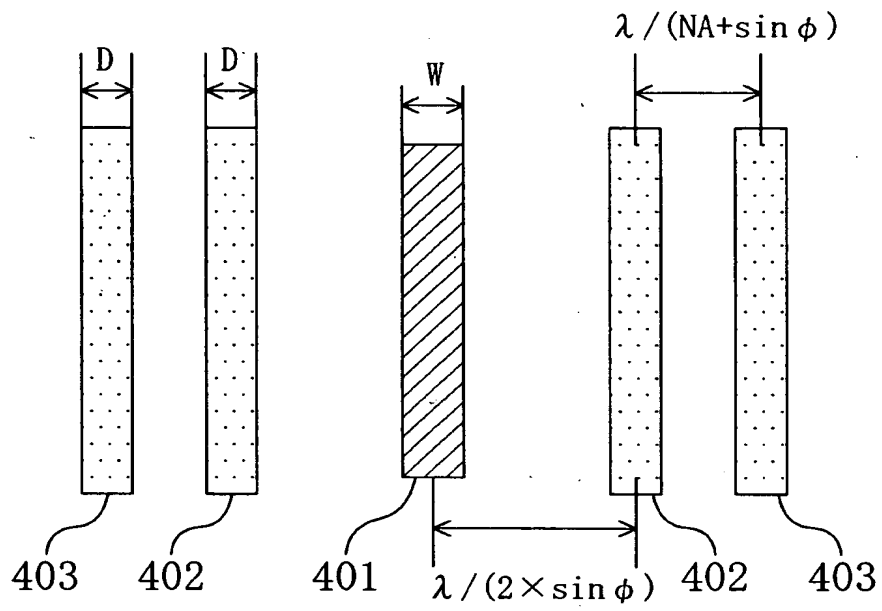
(a)



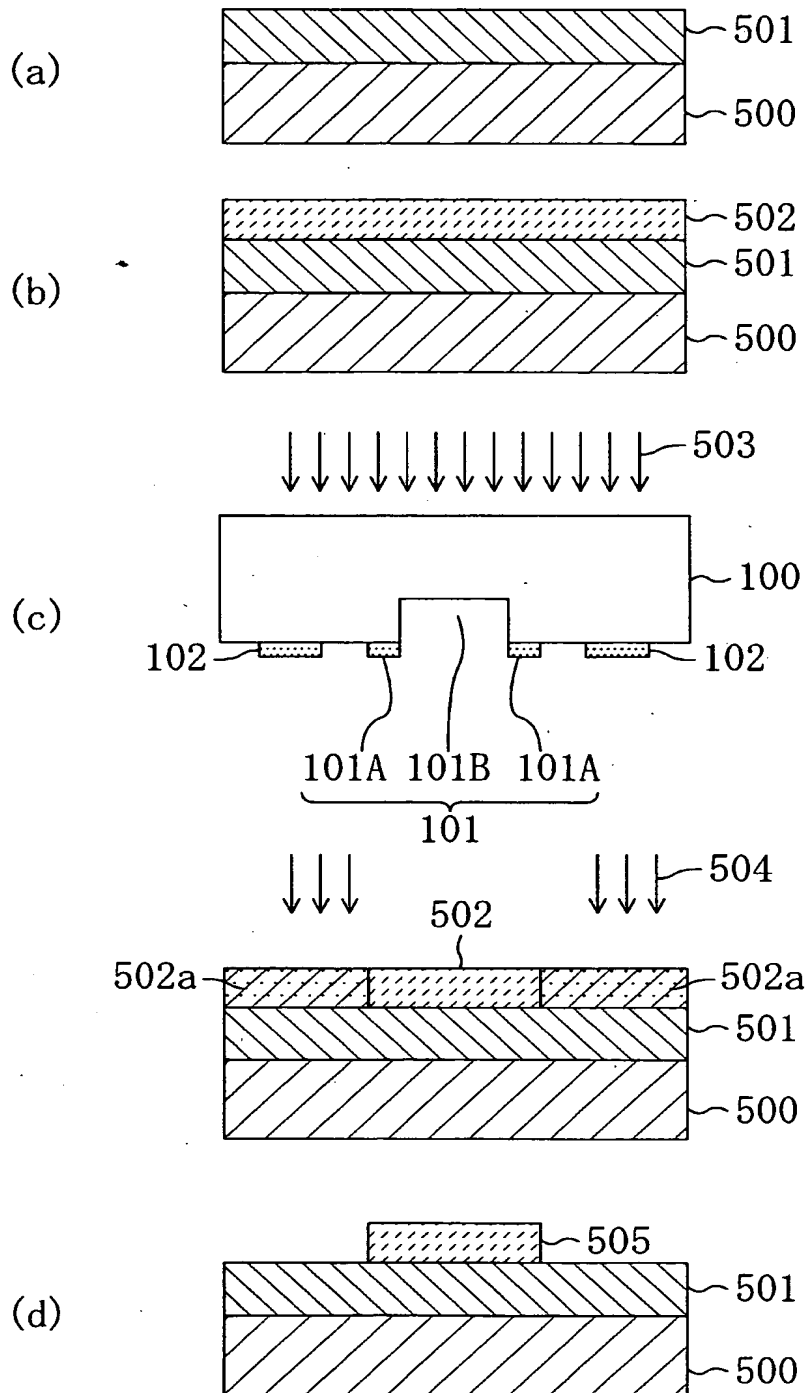
(b)



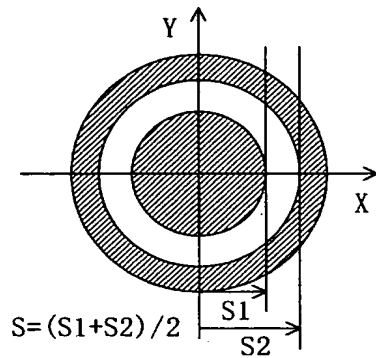
【図 1 6】



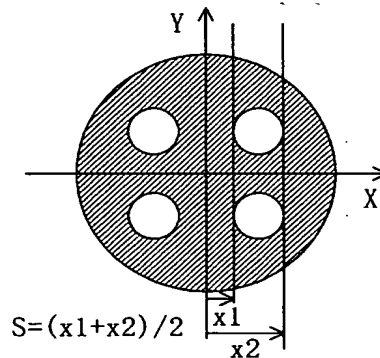
【図 1 7】



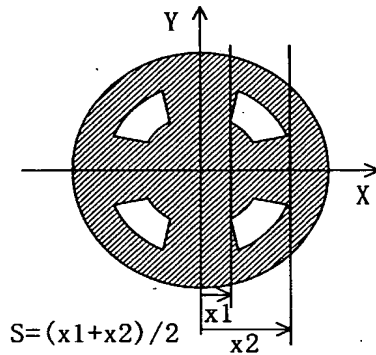
【図 18】



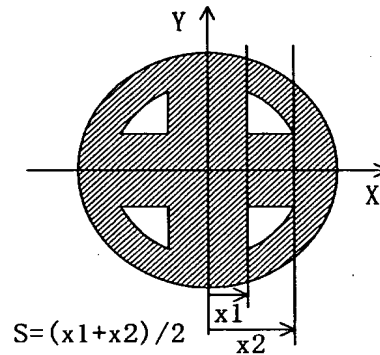
(a) 輪帯照明



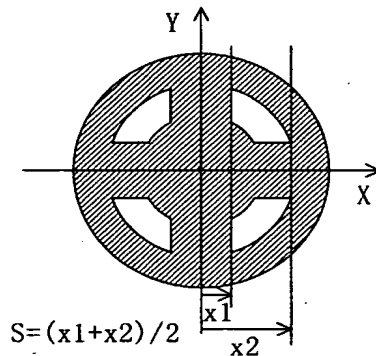
(b) 4眼照明



(c) 4眼照明

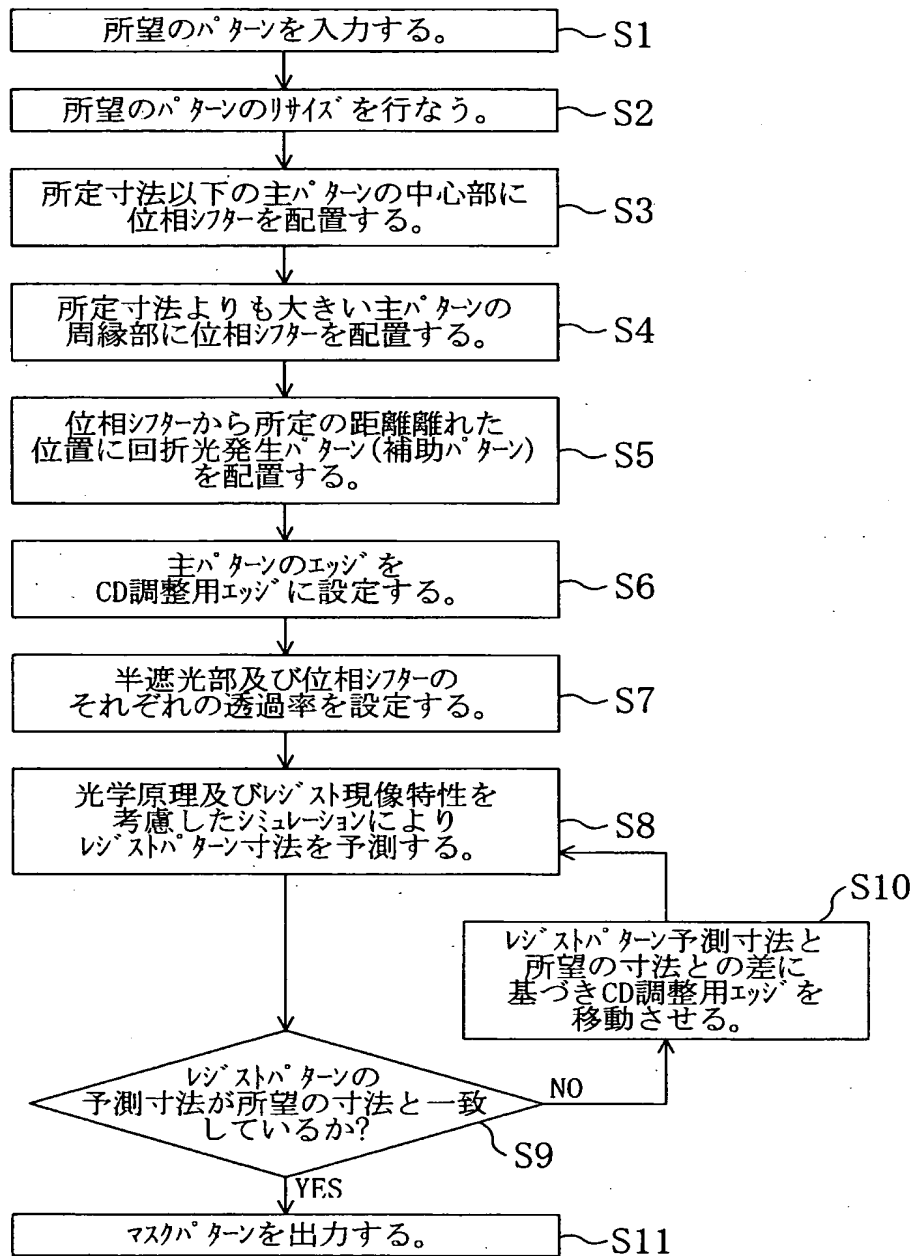


(d) 4眼照明

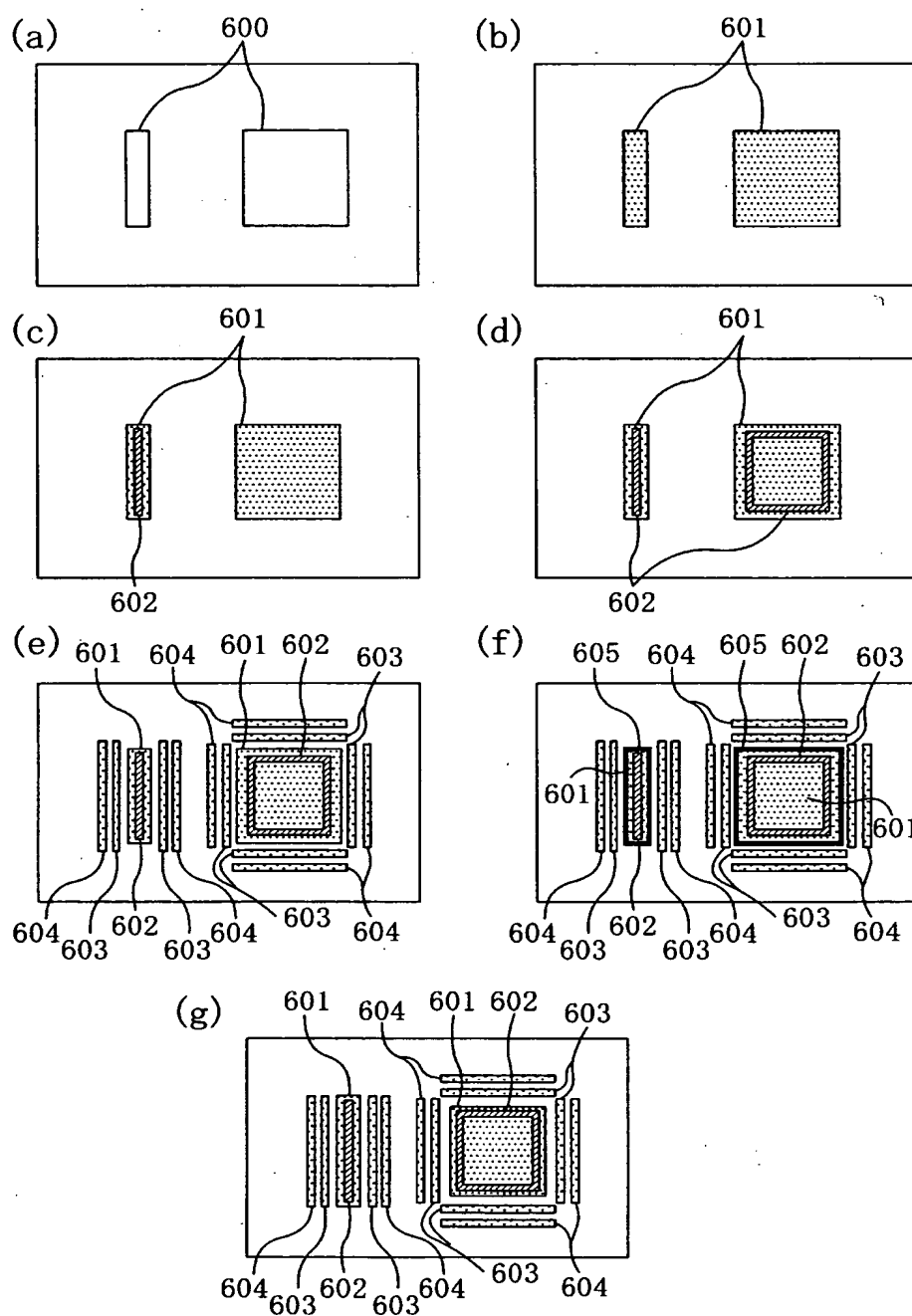


(e) 4眼照明

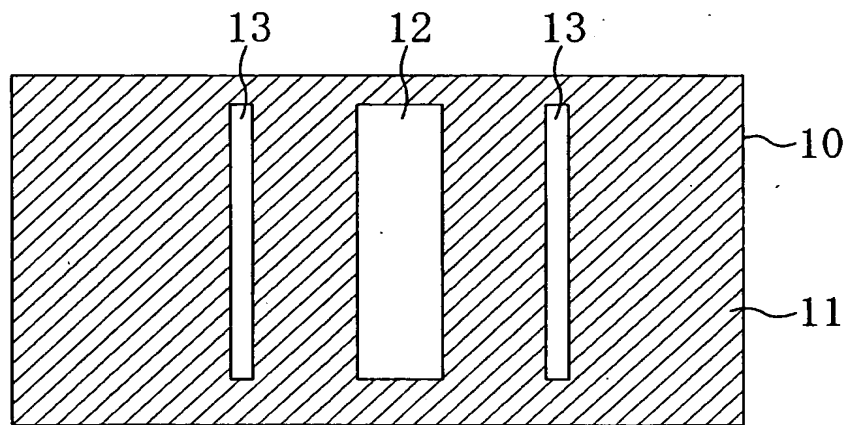
【図 1 9】



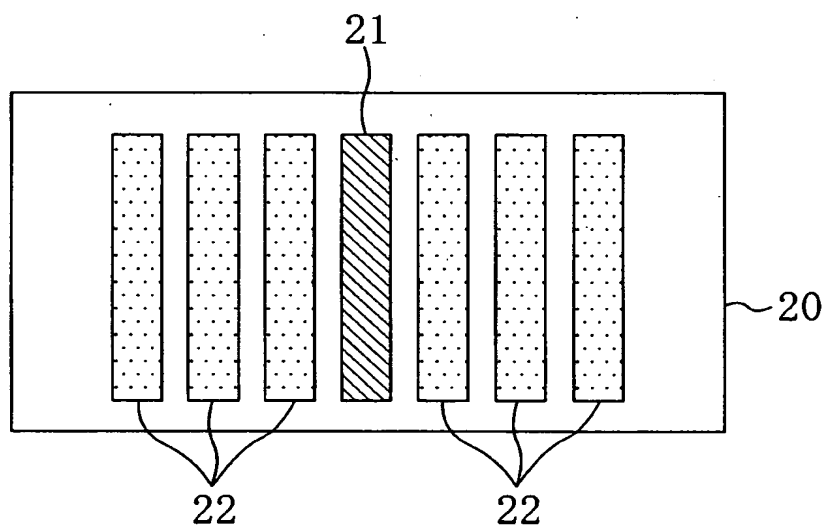
【図 2 0】



【図 21】



【図 22】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 任意形状のパターンの形成においてコントラスト及びDOFを向上させる。

【解決手段】 透過性基板100の上に、露光により転写される主パターン101が設けられている。主パターン101は、露光光を部分的に透過させる第1の透過率を有する第1の半遮光部101Aと、位相シフター101Bとから構成されている。透過性基板100上における主パターン101の両側に、露光光を回折させ且つ露光により転写されない一对の補助パターン102が設けられている。

【選択図】 図1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000005821]

1. 変更年月日	1990年 8月28日
[変更理由]	新規登録
住 所	大阪府門真市大字門真1006番地
氏 名	松下電器産業株式会社